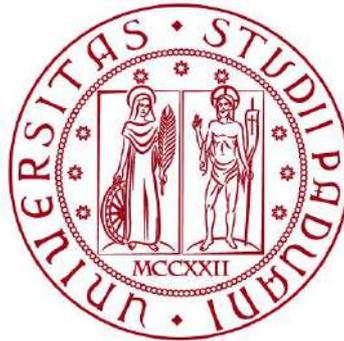


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile - Architettura



TESI DI LAUREA

**ANALISI DI VULNERABILITÀ SISMICA DELLA BASILICA DI
SAN BENEDETTO A NORCIA DOPO IL TERREMOTO DEL
2016: INDAGINI STRUTTURALI, MODELLAZIONE
NUMERICA E H-BIM**

Relatrice:
Prof.ssa MARIA ROSA VALLUZZI

Laureanda: KELLY PAGAN
1118792

Correlatori:
Ing. ELVIS CESCATTI
Prof. MICHELE SECCO
Prof. CARLO ZANCHETTA

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Alla mia famiglia

A Edoardo

RINGRAZIAMENTI

In primis desidero ringraziare la professoressa Maria Rosa Valluzzi per avermi dato la possibilità di affrontare questo interessante percorso di tesi che mi ha permesso di entrare nel mondo delle costruzioni storiche e affrontare un tema tanto complesso quanto rilevante della Basilica di San Benedetto a Norcia.

Un profondo ringraziamento va quindi all'ingegner Elvis Cescatti, che fin dall'inizio mi ha accompagnato in questo percorso di studio, al professor Carlo Zanchetta, che ha da subito dimostrato interesse e passione condividendo le sue idee e i suoi obiettivi. Un ringraziamento sentito, inoltre, va anche a tutto il gruppo di ricerca con il quale ho vissuto la mia prima esperienza in cantiere a Norcia in occasione delle indagini in situ, in modo particolare al prof. Michele Secco, che mi ha coinvolto con il suo entusiasmo e alla prof.ssa Rita Deiana.

Ringrazio, inoltre, chiunque mi sia stato vicino e abbia condiviso con me anche solo un piccolo pezzo di questo percorso universitario. Innanzitutto, i miei compagni di corso, con i quali ho condiviso gioie e dolori di tutti i lavori di gruppo e di tutti gli esami preparati insieme.

Un grazie sincero va a Francesca, non solo amica ma anche coinquilina stupenda, e Flavia, amiche da quando avevamo tre anni, con le quali ho sempre condiviso una sincera amicizia, tra risate e studio. E un grazie non può non andare anche a tutti i miei amici, a quelli di una vita, che mi hanno visto crescere e con i quali ho vissuto momenti che non si possono dimenticare.

Un ringraziamento, che va ben oltre questo percorso universitario, va fatto inoltre a tutti i miei familiari, che non hanno mai dubitato di me.

Ai miei nonni, perché siete sempre stati fieri dei miei risultati. Alla nonna Lidia e a nonno Rodolfo, alla nonna Gianna e nonno Sergio: siete un punto di riferimento, mi avete sempre insegnato da che parte guardare e insegnato valori che porto sempre nel cuore.

Agli zii, che non hanno mai mancato una parola di attenzione verso di me.

In modo particolare, il ringraziamento più grande va fatto ai miei genitori, Desi e Marino. Grazie perché mi avete sempre sostenuto, sempre spronato a dare il meglio ed è soprattutto grazie a quello che avete fatto e fate per me ogni giorno se sono arrivata a questo tanto ambito e desiderato traguardo. Dietro questa piccola vittoria ci siete voi, ci sono i vostri insegnamenti e soprattutto, il vostro amore.

Un enorme grazie va anche alla mia sorellina Chiara, perché anche dietro mille litigi so che si nasconde un amore incondizionato e che posso e potrò sempre contare su di te.

Infine, un ringraziamento particolare va a Edoardo, il mio più che compagno di vita. Se questi anni di università li riconosco come anni da ricordare è anche grazie a te e a tutto quello che abbiamo condiviso e superato assieme. Grazie perché mi hai dato la forza per credere in me stessa, anche nei momenti più bui, quando pensavo di non potercela fare. Il tuo continuo supporto è stato ed è fondamentale per me, per arrivare a raggiungere questo obiettivo e potere così iniziare a costruire, passo dopo passo, i nostri sogni insieme.

Grazie.

INDICE

RINGRAZIAMENTI.....	I
INDICE.....	V
1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 ORGANIZZAZIONE TESI	3
2. REVISIONE LETTERATURA	7
2.1 VULNERABILITÀ SISMICA DELLE CHIESE.....	7
2.2 PERCORSO DI CONOSCENZA.....	10
2.3 MURATURA.....	11
2.4 VALUTAZIONE QUALITÀ MURARIA	13
2.4.1 Metodo di valutazione I.Q.M.....	13
2.4.2 Metodo di valutazione L.M.T.....	16
2.4.3 Correlazione di IQM con i parametri meccanici della muratura.....	18
2.5 INDAGINI IN SITU	20
2.5.1 Prove soniche	22
2.5.2 Carotaggi.....	23
2.5.3 Prove endoscopiche	24
2.5.4 Georadar	25
2.6 PRELIEVI DI MALTA	28
2.6.1 Analisi mineralogica in diffrazione ai raggi X delle polveri (XRDP).....	28
2.6.2 Studio del campione in microscopia ottica a trasmissione (TL-OM)	30
2.6.3 Studio microstrutturale e microchimico in microscopia elettronica a scansione con associato sistema di analisi chimica in fluorescenza X a dispersione di energia (SEM-EDS)	31

2.7	CALCOLO DEI CINEMATISMI	32
2.7.1	<i>Cinematismo di ribaltamento globale di facciata fuori piano</i>	32
2.7.2	<i>Flessione orizzontale di parete</i>	33
2.8	MODELLAZIONE NUMERICA	33
2.8.1	<i>Modellazione ad Elementi Finiti (FEM)</i>	34
2.8.2	<i>Legame costitutivo: Total Strain Based Crack Model</i>	35
3.	INQUADRAMENTO CASO STUDIO E ANALISI SISMICA DEL TERRITORIO	37
3.1	SISMICITÀ DELL'AREA DI STUDIO	39
4.	ANALISI STORICO-COSTRUTTIVA	41
4.1	FASE PRE-GOTICA	44
4.2	TERREMOTO 4 DICEMBRE 1328	46
4.3	TERREMOTO 1703 E 1730	53
4.4	TERREMOTO 22 AGOSTO 1859.....	57
4.5	INTERVENTI DI RESTAURO DAL 1958	61
4.6	INTERVENTI DEL 2000, ANNO DEL GUBILEO	65
4.7	CRIPTA	67
5.	INDAGINI IN SITU	69
5.1	STUDIO DELLE CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE TRAMITE ANALISI DEI MATERIALI LEGANTI	71
5.1.1	<i>Analisi mineralogica in diffrazione ai raggi X (XRPD)</i>	75
5.1.1.1	<i>Preparazione dei campioni</i>	75
5.1.1.2	<i>Risultati analisi mineralogiche in diffrazione ai raggi X delle polveri (XRPD)</i>	79
5.1.2	<i>Analisi in microscopia ottica (OM-TL) ed elettronica (SED-EMS)</i>	82
5.1.2.1	<i>Preparazione dei campioni</i>	82
5.1.2.2	<i>Risultati analisi petrografiche in microscopia ottica (OM-TL)</i>	85
5.1.2.3	<i>Risultati analisi microstrutturali e microchimiche in microscopia elettronica a scansione con associata microanalisi chimica in fluorescenza X a dispersione di energia (SEM-EDS)</i>	90
5.2	PROVE SONICHE.....	97
5.2.1	<i>Prova sonica diretta</i>	97
5.2.2	<i>Prova sonica tomografica</i>	100
5.3	CAROTAGGI E VIDEO-ENDOSCOPIE	102
5.3.1	<i>Transetto</i>	103
5.3.2	<i>Abside</i>	107

5.4	GEORADAR.....	111
5.4.1	<i>Facciata</i>	111
5.4.2	<i>Transetto</i>	114
5.4.3	<i>Abside</i>	116
5.4.4	<i>Pavimento</i>	117
6.	QUALITÀ MURARIA.....	119
6.1	NAVATA	120
6.2	CAMPANILE.....	123
6.3	TRANSETTO.....	127
6.4	TABELLA RIASSUNTIVA.....	132
7.	ANALISI COMPORTAMENTO IN SEGUITO ALLO SCIAME SISMICO DEL 2016 ...	135
7.1	SISMA DEL 24 AGOSTO 2016	135
7.2	SISMA DEL 26 OTTOBRE 2016.....	138
7.3	SISMA DEL 30 OTTOBRE 2016.....	140
7.4	EVOLUZIONE DANNO.....	148
8.	MODELLAZIONE A ELEMENTI FINITI (FEM) IN AMBIENTE DIANA.....	153
8.1	ANALISI DEI CARICHI	153
8.1.1	<i>Copertura navata</i>	154
8.1.2	<i>Copertura Portico delle Misure</i>	155
8.1.3	<i>Copertura transetto destro e abside</i>	156
8.1.4	<i>Copertura transetto sinistro</i>	157
8.2	DEFINIZIONE DEL MODELLO IN DIANA PER ANALISI FEM	158
8.2.1	<i>Modellazione geometrica</i>	158
8.2.2	<i>Muratura</i>	160
8.2.3	<i>Coperture</i>	162
8.2.4	<i>Vincoli</i>	162
8.2.5	<i>Discretizzazione</i>	163
8.3	ANALISI STATICA LINEARE	165
8.4	ANALISI MODALE	167
8.5	ANALISI NON LINEARE	171
8.5.1	<i>Analisi di sensitività</i>	172
8.5.2	<i>Risultati modello</i>	174
8.5.3	<i>Valutazione vulnerabilità degli elementi</i>	184
8.5.4	<i>Confronto risultati del modello con la realtà</i>	190

9. HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING (H-BIM)	195
9.1 DAL CONCETTO DI BIM A H-BIM	195
9.2 “REVERSE ENGINEERING”: DAL RILIEVO GEOMETRICO ALLA REALIZZAZIONE DEL MODELLO INFORMATIVO (H-BIM)	198
9.3 LIVELLO DI DETTAGLIO (LOD)	201
9.4 DIGITALIZZAZIONE DEL DANNO	203
9.5 DIGITALIZZAZIONE	208
9.6 INDUSTRY FOUNDATION CLASSES (IFC)	212
9.7 OSSERVAZIONI	217
10. CONCLUSIONI	221
BIBLIOGRAFIA.....	227
APPENDICE.....	235
A - TABELLE TEMPI DI VOLO PROVE SONICHE.....	237
B - SCHEDE DI QUALITÀ MURARIA	241
C - TAVOLE DI RILIEVO DELLO STATO DI FATTO	269
D - TAVOLE RISULTATI INDAGINI	275

1. INTRODUZIONE

L'Italia è un paese ad elevato rischio sismico. Il rischio sismico è determinato da una combinazione della pericolosità sismica, della vulnerabilità e dell'esposizione. La pericolosità sismica dipende dalle caratteristiche fisiche del terreno e lo studio della storia sismica di un'area, unitamente all'osservazione di caratteristiche geografiche e morfologiche ed a considerazioni di tipo probabilistico, utili per definire dei termini di previsione. La vulnerabilità, invece, può essere definita come la predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata. Possiamo dire che l'Italia ha una pericolosità sismica medio-alta, per frequenza e intensità dei terremoti, e una vulnerabilità molto elevata, dettata dalla fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi.

A definire uno dei parametri per la caratterizzazione del rischio sismico è l'esposizione, ovvero la maggiore o minore presenza di beni a rischio. Il territorio italiano ha un'esposizione altissima, infatti è un paese che può vantare della presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico al mondo. Risulta di fondamentale importanza, dunque, conservare e preservare gli edifici storici presenti nel territorio italiano. Tra tutti, gli edifici che risultano essere tra i più vulnerabili alle azioni sismiche sono le chiese. Esse, infatti, presentano un'architettura molte volte unica e complessa, caratterizzata dalla presenza di varie fasi costruttive, simbolo degli eventi e dei secoli di trasformazione di cui molto spesso sono oggetto. È proprio in riferimento ad una chiesa che si svolge il seguente lavoro di tesi, affrontando il caso studio della Basilica di San Benedetto a Norcia.

La Basilica di San Benedetto, collocata a Norcia al centro dell'omonima piazza, è stata gravemente danneggiata dalla sequenza sismica che ha colpito il centro Italia nel 2016. In modo particolare, l'evento sismico del 30 ottobre 2016 ha portato al crollo quasi totale della Basilica. Questa situazione, unita al diffuso danno delle parti rimaste, ha reso necessario in questi anni un intervento di messa in sicurezza della Basilica, sia per garantire la conservazione degli elementi architettonici e decorativi superstiti, sia per rendere agibili gli spazi pubblici e privati attorno all'edificio.

I primi interventi sono stati eseguiti con urgenza dopo il terremoto del 2016 e riguardano la messa in sicurezza di tutti quegli elementi rimasti pericolanti a seguito del sisma. Si è iniziato con la messa in sicurezza della facciata per la quale è stata prevista la realizzazione di una struttura in

tubo-giunto in grado di trattenere la facciata in entrambe le direzioni, operazione completata già a dicembre 2016.

Nella porzione di campanile rimasta, alla luce dei meccanismi evidenziati nella lettura del quadro fessurativo, si sono realizzate due puntellazioni al fine di prevenire il ribaltamento e lo scorrimento alla base dell'intera porzione di campanile rimasta, anch'essa fessurata.

Un'operazione di messa in sicurezza è stata eseguita anche per abside e transetto destro, con la realizzazione di un ponteggio esterno connesso in alcuni punti con l'interno. Questi primi interventi sono stati curati e diretti dallo studio dell'ing. Claudio Modena dell'Università di Padova, condivisi e coordinati dal Nucleo Interventi Speciali dei Vigili del Fuoco.

Questa tesi si inserisce nell'ambito di un accordo di cooperazione scientifica, a cui prende parte l'Università degli Studi di Padova, per alcune attività di studio riguardanti la Basilica di San Benedetto a Norcia. Si tratta di una convenzione di ricerca stipulata tra l'*Ufficio del Soprintendente Speciale* per le aree colpite dal sisma del 24 agosto 2016, la *Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio dell'Umbria*, l'*Archidiocesi di Spoleto – Norcia* e, appunto, il *Centro Interdipartimentale di Ricerca CIRCe* dell'Università degli Studi di Padova.

Le attività di ricerca prevedono un approfondimento delle indagini storiche dell'immobile così da fornire una guida alla pianificazione, alla scelta e all'esecuzione delle indagini tecnico-scientifiche, utili per le operazioni propedeutiche alla fase di progettazione, restauro e ricostruzione della Basilica. La conoscenza di questi elementi risulta essere di fondamentale importanza anche per la determinazione della vulnerabilità degli elementi rimasti danneggiati a seguito del sisma.

L'obiettivo ultimo di tutte le parti coinvolte è l'intervento di Recupero e Ricostruzione della Basilica di San Benedetto. Nel 2020 è stato bandito, infatti, un *Concorso Internazionale di Progettazione* con l'obiettivo di affidare la ricostruzione della Basilica "com'era dov'era". Si tratta quindi di recuperare la Basilica garantendone la conservazione dei valori, la salvaguardia delle parti architettoniche superstiti, nonché la ricollocazione, dove possibile, di tutte quelle porzioni recuperate a seguito della rimozione di tutte le macerie.

Il seguente lavoro di tesi ha come obiettivo una conoscenza approfondita della Basilica di San Benedetto sia per quanto riguarda le motivazioni che hanno portato al crollo della Basilica che per la caratterizzazione attuale delle sue condizioni al fine di una sua possibile ricostruzione. Con lo scopo di raggiungere questo livello approfondito di conoscenza si è ricorso all'utilizzo di una metodologia integrata e sviluppata in diverse fasi.

Dapprima, è stata eseguita una revisione della letteratura al fine di comprendere quali fossero gli strumenti più adatti da utilizzare con lo scopo di raggiungere un'adeguata conoscenza dell'edificio. In questa prima fase è emerso come le chiese siano da sempre altamente vulnerabili e come esse, anche a seguito di terremoti di più bassa intensità, siano comunque soggette a danneggiamento. Essenzialmente, infatti, le chiese sono costituite da muratura e hanno delle caratteristiche architettoniche che le rendono più vulnerabili rispetto ad altri edifici ordinari, congiuntamente al fatto che sono edifici che spesso presentano una precedente storia sismica e

che quindi sono stati oggetto di danneggiamenti e conseguenti riparazioni avvenute nel corso dei secoli. In ragione di queste osservazioni, un primo studio ha riguardato l'identificazione delle fasi costruttive, svolta mediante un'approfondita analisi storico-documentale. Da questa analisi è emerso come la Basilica sia stata oggetto di crolli e danneggiamenti a seguito di diversi eventi sismici, con successive modifiche e ricostruzioni. Tutte le ipotesi emerse da questa prima identificazione storica sono state poi confermate, o talvolta integrate, da un'analisi dei materiali leganti. Nel corso di due diverse campagne di indagini (la prima svoltasi a settembre 2019 e la seconda a novembre 2020) sono stati prelevati un numero di 43 campioni, poi portati in laboratorio al fine di essere preparati per l'esecuzione di analisi in diffrazione ai raggi X e analisi in microscopia ottica ed elettronica. Nel corso della seconda campagna di indagini realizzata a novembre 2020 sono state effettuate, inoltre, prove sui materiali, comprendenti prove soniche, georadar e carotaggi abbinati ad endoscopia. Queste ultime hanno permesso di caratterizzare nel dettaglio la struttura della Basilica.

Tutte le informazioni ricavate dalla fase di conoscenza dell'edificio, comprendenti anche l'identificazione del quadro fessurativo dell'edificio e l'evoluzione del danno a seguito degli eventi sismici che ne hanno comportato il quasi totale crollo, hanno portato alla realizzazione di due diversi modelli. Il primo è un modello numerico FEM (*Finite Element Model*) per un'analisi ad elementi finiti della Basilica di San Benedetto, al fine di valutarne il comportamento sismico e gli elementi di vulnerabilità che hanno portato al crollo. La seconda tipologia di modellazione ha compreso la realizzazione di un modello H-BIM (*Heritage Building Information Modelling*) della Basilica di San Benedetto. Vista la complessità del caso studio, si propone un'introduzione all'applicazione dell'H-BIM, inteso come un modello informativo realizzato nell'ambito della digitalizzazione del patrimonio costruito e contenente, dunque, tutte le informazioni ricavate nella fase di conoscenza.

1.1 ORGANIZZAZIONE TESI

Si riporta, in sintesi, la suddivisione dei capitoli:

- 1 - INTRODUZIONE: a seguito di un primo breve inquadramento della Basilica di San Benedetto e delle vicissitudini che la hanno coinvolta, vengono mostrate le tematiche che verranno affrontate e l'organizzazione della tesi.
- 2 - REVISIONE LETTERATURA: si descrivono, in sintesi, le caratteristiche delle chiese e la loro vulnerabilità. Viene analizzata nello specifico l'importanza della conoscenza dell'edificio, soprattutto nel caso di un bene culturale, individuando quindi gli strumenti necessari per raggiungere questo obiettivo.
- 3 - INQUADRAMENTO CASO STUDIO E ANALISI SISMICA DEL TERRITORIO: viene fatto un breve inquadramento territoriale e sismico della città di Norcia su cui sorge la Basilica di San Benedetto.
- 4 - ANALISI STORICA-COSTRUTTIVA: vengono illustrate nel dettaglio tutte le fasi storiche emerse a seguito di analisi documentale, comprendenti tutte quelle modifiche che hanno portato la Basilica ad essere, nel 2016, una fabbrica eterogenea, frutto di diverse trasformazioni.

- 5 - INDAGINI IN SITU: in questo capitolo viene illustrata la campagna di indagine realizzata a novembre 2020 e i risultati emersi. In modo particolare, in fase di indagine sono stati prelevati 43 campioni di materiale legante sparsi nella quasi totalità della Basilica e sono state eseguite prove soniche in facciata, indagini georadar in tutti i prospetti e carotaggi abbinati ad endoscopia nella zona del transetto e dell'abside. Tutte le prove sono state necessarie per una caratterizzazione dettagliata della Basilica.
- 6 - QUALITÀ MURARIA: viene effettuata in questo capitolo la valutazione della qualità muraria in sei porzioni di muratura ritenute significative per l'intero edificio.
- 7 - ANALISI DEL COMPORTAMENTO IN SEGUITO ALLO SCIAME SISMICO DEL 2016: viene mostrato il danno verificatosi a seguito dei tre eventi sismici che hanno colpito la Basilica di San Benedetto dal 24 agosto al 30 ottobre 2016.
- 8 - MODELLAZIONE AD ELEMENTI FINITI (FEM) IN AMBIENTE DIANA: in questo capitolo si affronta la modellazione strutturale della Basilica realizzata in ambiente DIANA FEA_{BV}. Si esegue una modellazione ad elementi finiti comprendente, dapprima, una analisi statica lineare e un'analisi modale al fine di studiare i modi di vibrare dell'edificio. Infine, si esegue l'analisi non lineare. Viene studiato il comportamento della Basilica nelle quattro direzioni principali, analizzandone i fenomeni di rottura. Il comportamento che emerge dai risultati del modello viene, successivamente, messo a confronto con i danni reali che si sono potuti osservare dopo il sisma del 2016. L'utilizzo di modelli diversi permette, inoltre, di valutare gli elementi più vulnerabili dell'edificio.
- 9 - HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING (H-BIM): in questo capitolo si affronta il tema del *Building Information Modeling* (BIM) esteso alle costruzioni esistenti. Si spiegano, quindi, i passaggi effettuati per la realizzazione di un modello informativo che ha come obiettivo la digitalizzazione del patrimonio esistente. Questo si ottiene mediante l'inserimento all'interno del modello di tutte le informazioni derivanti dalla conoscenza dell'edificio.
- 10 - CONCLUSIONI: si riportano le considerazioni finali del lavoro di tesi, comprendenti alcuni possibili sviluppi futuri.

APPENDICE A - Sono contenute due tabelle relative ai tempi di volo e alle velocità calcolate per ogni punto di battitura della prova sonica diretta e della prova sonica tomografica.

APPENDICE B - Vengono riportate le "*Schede di 1° livello per il rilievo della tipologia e della qualità della muratura*" compilate per ciascuna delle sei porzioni di muratura individuate al Capitolo 6 per l'analisi della qualità muraria.

APPENDICE C - Sono riportate le tavole rappresentanti lo *stato di fatto* dell'edificio e realizzate tramite confronto accurato con ortofoto ricavate dalla nuvola di punti.

APPENDICE D - Sono riportate le tavole di dettaglio relative alla localizzazione e ai risultati di tutte le indagini eseguite sulla Basilica di San Benedetto.

In Figura 1 si riporta uno schema riassuntivo del lavoro affrontato nel seguente percorso di tesi.

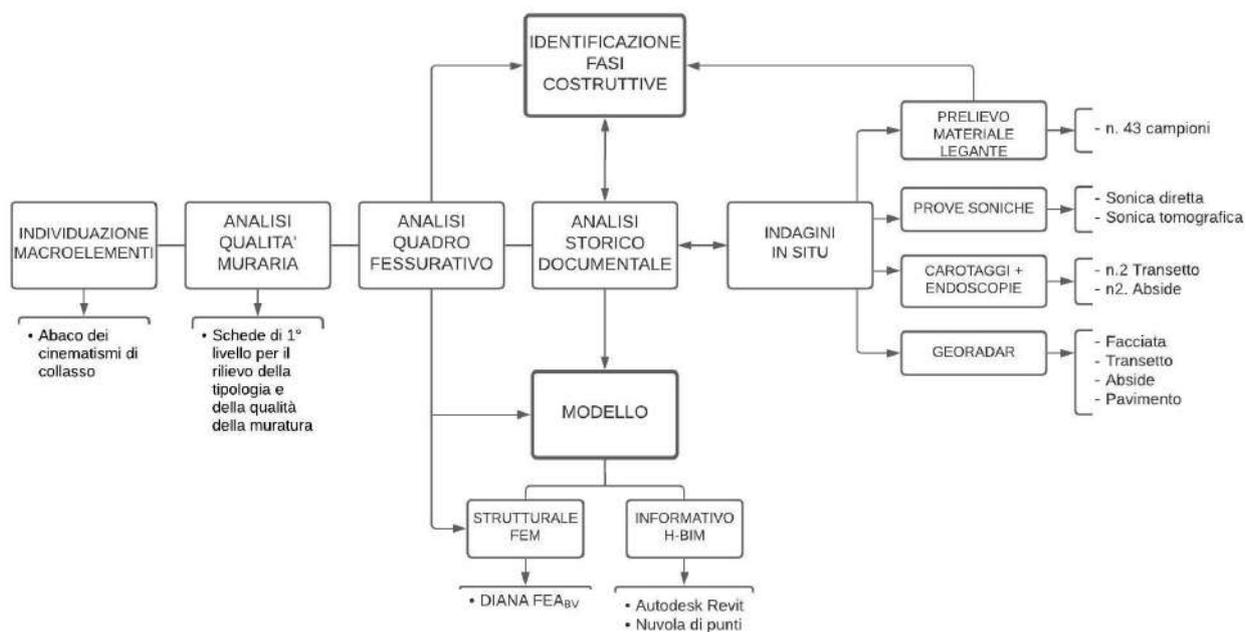


Figura 1 – Schema riassuntivo del lavoro di tesi

2. REVISIONE LETTERATURA

2.1 VULNERABILITÀ SISMICA DELLE CHIESE

I terremoti che si sono verificati nell'ultimo secolo (Figura 2), tra i quali possiamo ricordare il terremoto del Friuli del 1976, l'Umbria-Marche del 1997, quello che ha colpito l'Aquila nel 2009 e l'Emilia nel 2012, hanno evidenziato che soprattutto le chiese in muratura e gli edifici monumentali sono vulnerabili alle azioni sismiche anche in caso di bassa intensità dei terremoti. È importante sottolineare quanto sia fondamentale la valutazione del danno di questi edifici a seguito del sisma, in ragione dell'alto valore artistico e culturale che essi rivelano. Le chiese, infatti, non solo sono un simbolo per la comunità ma, molto spesso, contengono al loro interno beni culturali e sono esse stesse un bene culturale. Le chiese, dunque, devono essere protette da un ulteriore stato di danneggiamento [Doglioni et al., 1994].

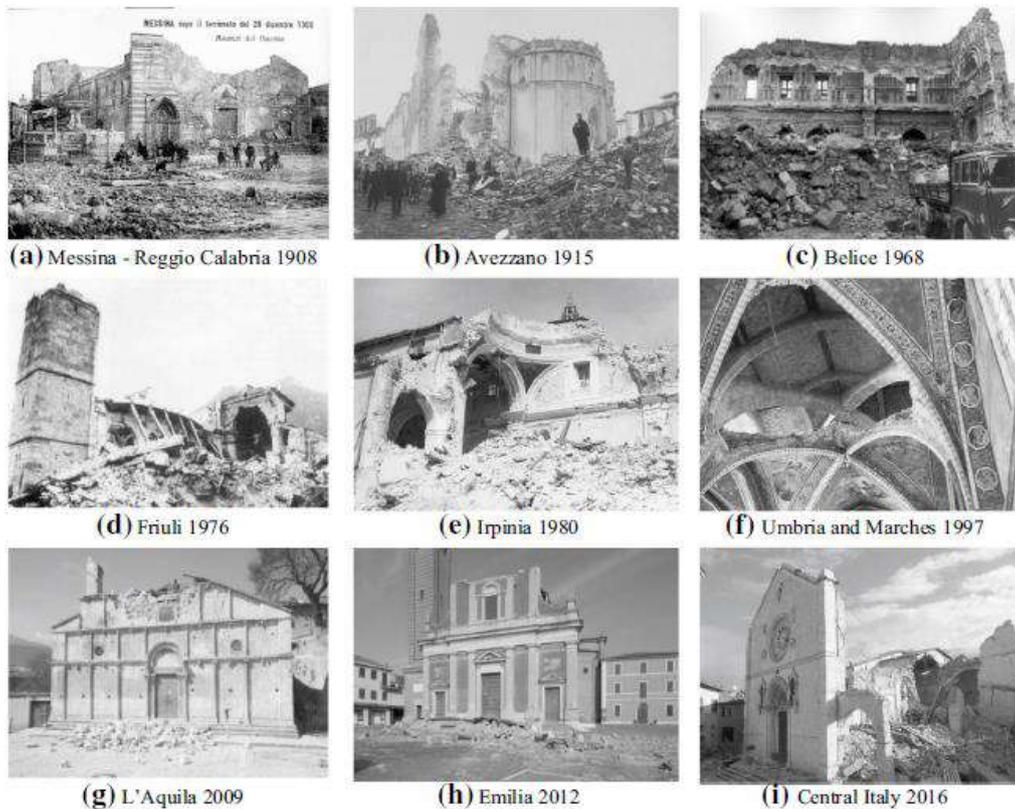


Figura 2 - Esempi di chiese danneggiate in terremoti italiani [Penna et al., 2019]

La vulnerabilità che caratterizza le chiese può essere strettamente correlata alla loro progettazione architettonica, basata su grandi sale senza pareti interne. La mancanza di diaframmi interni rende le pareti più snelle di quelle degli edifici ordinari. Inoltre, la quasi sempre presenza di archi e volte comporta la formazione di spinte statiche fuori piano. Ciò si traduce in una maggiore vulnerabilità di strutture in muratura rispetto a meccanismi fuori piano che possono essere indotti dalle forze sismiche [Penna et al., 2019].

Con riferimento ai terremoti più gravi che hanno colpito l'Italia, sono stati eseguiti diversi studi che hanno evidenziato l'attivazione di specifici meccanismi di danno nelle chiese. In particolare, si è potuto osservare come il comportamento di una chiesa a seguito del sisma possa essere studiato suddividendo la chiesa stessa in macroelementi, o parti architettoniche, caratterizzate da una risposta strutturale indipendente rispetto a quella dell'intero fabbricato [Doglioni et al., 1994]. Sono stati individuati 13 macroelementi all'interno delle chiese corrispondenti a facciata, campanile, abside, navata, etc. Ciascun macroelemento può presentare diverse tipologie di danno, arrivando a definire un totale di 28 meccanismi (Figura 3) che possano descrivere il comportamento di quella specifica parte architettonica.



Figura 3 - Macroelementi e meccanismi di danno per le chiese [Doglioni et al., 1994]

Molto spesso i danni delle chiese non derivano solo dalla loro conformazione strutturale. Nell'ultimo evento sismico che ha colpito l'Italia tra il 2016 e il 2017, le chiese danneggiate hanno risentito molto anche dell'influenza dei diversi metodi costruttivi che le caratterizzano. In modo particolare, si fa riferimento all'utilizzo di svariati materiali da costruzione e l'adozione di diversi stili architettonici anche all'interno dello stesso edificio, attribuibili a diverse epoche. Le chiese, infatti, si presentano molto spesso come frutto di diverse trasformazioni e riparazioni avvenute nel corso dei secoli, anche a causa dei terremoti che le hanno colpite in precedenza [Penna et al., 2019]. Ad esempio, diverse chiese che sono state danneggiate dai terremoti del 2016-2017 erano già state danneggiate da altri terremoti, relativamente recenti rispetto a questo, quali il terremoto Umbria-Marche del 1997 e quello dell'Aquila del 2009. Le chiese in oggetto hanno quindi subito interventi di riparazione e, in alcuni casi, i danni relativi al nuovo sciame sismico hanno rivelato lesioni e fessure che si erano già presentate con eventi sismici precedenti e che erano già state riparate prima.

La vulnerabilità sismica delle chiese è significativamente più elevata rispetto agli edifici ordinari costruiti in muratura. Tale concetto è confermato dallo scenario sismico che si è verificato nel Centro Italia tra il 2016 e il 2017, comprendendo un vasto territorio per un'area di 30 000 km² [Penna et al., 2019]. Di fondamentale importanza risulta sottolineare come il Centro Italia sia stato da sempre caratterizzato da un'importante e continua attività sismica. La conoscenza dello stato attuale dei manufatti storici, quali le chiese, non può pertanto prescindere da un'analisi degli eventi che hanno colpito le zone geografiche oggetto di studio.

Si procede con un'analisi accurata dello sciame sismico che ha colpito il Centro Italia tra agosto e ottobre del 2016. Una zona molto estesa dell'Italia centrale, a partire dall'estate del 2016, è stata colpita da uno sciame sismico di notevole importanza. Gli eventi sismici hanno interessato le regioni di Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria. I *mainshocks*, con magnitudo momento maggiore di 5.5 sono stati registrati nei comuni di Accumoli (RI), Ussita (MC), Norcia (PG) e Capitignano (AQ), come riportati in Figura 4 [De Matteis et al., 2017].



Figura 4 - Mainshocks dello sciame sismico in Italia Centrale del 2016 [De Matteis et al., 2017]

Il terremoto del 30 ottobre 2016, con epicentro ubicato a 5 km da Norcia (PG), è stato l'evento più forte avvenuto in Italia dopo quello dell'Irpinia del 1980. Proprio in questa data si è verificato il crollo della Basilica di San Benedetto da Norcia, che era stata già colpita dalle precedenti scosse sismiche relative al 24 agosto e al 26 ottobre, causandone lesioni, crolli parziali e rendendo inagibile la Basilica. In Tabella 1 sono riportate nel dettaglio le caratteristiche relative allo sciame sismico sopra citato.

Tabella 1 - Sciame sismico agosto - ottobre 2016 [Cescatti et al., 2020]

DATA	ORA (UTC)	Lat (°)	Long (°)	Profondità (km)	Mw
2016-08-24	01:36:32	42.70	13.23	8.0	6.0
2016-10-26	17:10:36	42.88	13.13	9.0	5.4
2016-10-26	19:18:05	42.91	13.13	8.0	5.9
2016-10-30	05:40:17	42.84	13.11	9.0	6.5

2.2 PERCORSO DI CONOSCENZA

La conoscenza della costruzione storica in muratura è un presupposto fondamentale sia ai fini di una attendibile valutazione della sicurezza sismica attuale che per la scelta di un efficace intervento di miglioramento sismico. Le problematiche sono quelle comuni a tutti gli edifici esistenti anche se, nel caso del patrimonio culturale, è ancora più importante conoscere le caratteristiche originarie della fabbrica, le modifiche avvenute nel tempo e dovute in diversi casi dai fenomeni di danneggiamento derivanti dalle trasformazioni antropiche, dall'invecchiamento dei materiali e dagli eventi calamitosi. In molti casi, per non avere ulteriori perdite, l'esecuzione di una completa campagna di indagini può risultare troppo invasiva sulla fabbrica stessa [LL.GG.BB.CC., 2011].

Come espresso dalle Linee Guida per la Valutazione e la Riduzione del Rischio Sismico, da Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri [LL.GG.BB.CC., 2011], il percorso di conoscenza di un edificio storico può essere sviluppato come segue: dapprima si ha l'identificazione della costruzione, la sua collocazione in relazione a particolari aree di rischio e il rapporto con il contesto urbano circostante. Si prosegue poi con il rilievo geometrico della costruzione e l'individuazione dell'evoluzione della fabbrica, intesa come la descrizione di tutte le modifiche che la fabbrica ha subito nel tempo. Si procede con l'individuazione di tutti gli elementi che costituiscono la fabbrica, dai materiali ai dettagli costruttivi, con attenzione alle tecniche di realizzazione. Infine, si esegue l'identificazione dei materiali, delle loro proprietà meccaniche e dello stato di degrado complessivo dell'edificio e delle singole parti. Sull'edificio sono previste, inoltre, delle indagini conoscitive che hanno lo scopo di individuare quanto già scritto in precedenza, quindi confermare le ipotesi sulla storia del manufatto in relazione agli eventi sismici pregressi, le ipotesi riguardanti la geometria degli elementi e le caratteristiche meccaniche di questi e osservare fenomeni di dissesto e degrado. A posteriori, è spesso necessario un confronto con dei modelli numerici, in modo da accertare e verificare il comportamento manifestato nella

costruzione. Tutte queste informazioni sono informazioni integrate che permettono di raggiungere un'ottima conoscenza dell'edificio.

Il primo passo verso la conoscenza dell'edificio è un'analisi storico-documentale dell'edificio in questione. Attraverso la documentazione disponibile è necessario eseguire una ricostruzione della struttura e delle modifiche avvenute in esso nel corso dei secoli, siano esse funzionali o geometriche-strutturali. Di pari passo è necessaria, quindi, la conoscenza della geometria strutturale dell'edificio, che avviene tramite operazioni di rilievo e mediante l'utilizzo di piante, sezioni o prospetti a disposizione. Nella fase di rilievo geometrico viene rilevato e rappresentato l'eventuale quadro fessurativo, in modo tale da consentire l'individuazione delle cause e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'organismo.

Di estrema importanza è, in seguito, il rilievo materico e lo stato di conservazione dell'edificio, in modo da individuare l'organismo resistente della fabbrica. Ciò richiede l'acquisizione di informazioni spesso nascoste e può essere eseguito grazie a tecniche di indagine non distruttive di tipo indiretto quali termografia, georadar, tomografia sonica, ecc., o ispezioni dirette debolmente distruttive tra cui endoscopie, scrostamento di intonaci, saggi, piccoli scassi, ecc. Un aspetto rilevante è la scelta del numero, della tipologia e della localizzazione delle prove da effettuare. Per una corretta conoscenza esse dovrebbero essere adottate in modo diffuso, ma al fine di limitare l'impatto delle indagini, esse sono eseguite in modo mirato, laddove ne è ben giustificata la posizione e l'obiettivo della prova.

Di seguito vengono spiegati nel dettaglio alcuni metodi per la caratterizzazione meccanica dei materiali al fine di giungere ad una buona conoscenza e ad un giudizio sulla qualità dei materiali e del loro degrado.

2.3 MURATURA

La muratura è uno degli elementi costruttivi più antichi e di maggiore utilizzo. Le murature sono costituite dalla giustapposizione di elementi di varia natura, quali pietra o laterizio, collegati tra loro da materiale legante, quale la malta. In questo modo si ottengono elementi strutturali monolitici.

Le murature possono essere classificate secondo diversi criteri [Cazzani et al., 2017]:

- in base agli elementi utilizzati: si distinguono in murature in pietra, in laterizio o miste;
- in base al ruolo strutturale e alla tipologia strutturale: si distinguono in murature portanti e non portanti;
- in base alle tecniche di esecuzione e alla forma: sono distinte in murature monolitiche o di tipo articolato;
- in base all'apparecchiatura muraria: si distinguono in murature in foglio, a una testa, a due o più teste o a sacco.

Sebbene la muratura sia il materiale più utilizzato, soprattutto nell'ambito delle costruzioni storiche, la definizione delle sue caratteristiche meccaniche non è ancora ben delineata. Con il termine muratura, infatti, si va ad indicare un materiale composto, costituito da elementi

resistenti (mattoni, pietre) e leganti (malta). Il materiale muratura risulta essere un materiale discontinuo il cui comportamento è influenzato dalle proprietà dei suoi singoli componenti e dalla loro interazione [Binda et al., 2009a]. Se storiche, inoltre, le murature presentano fenomeni di invecchiamento, danneggiamenti, modifiche e possibili fenomeni di accumulo del danno dovuti alla storia sismica, tutte caratteristiche rilevanti nei materiali non lineari.

Gli elementi che la compongono, elementi resistenti e malta, sono dotati di proprie proprietà meccaniche differenti e devono essere valutate anche le superfici di contatto tra elementi resistenti e malta, le quali sono considerate dei piani deboli poiché lungo di essi si concentrano la maggior parte delle lesioni. Il comportamento dell'intera muratura può essere valutato studiando quello dei suoi singoli componenti sfruttando tecniche di omogeneizzazione. Il composito risulta essere fortemente anisotropo, ed è caratterizzato da una buona resistenza a compressione e scarsa resistenza a trazione.

In Figura 5 è possibile osservare una grande differenza di resistenza tra i due elementi e, inoltre, un tipo di comportamento completamente opposto, elasto-fragile per i blocchi ed elasto-plastico per la malta.

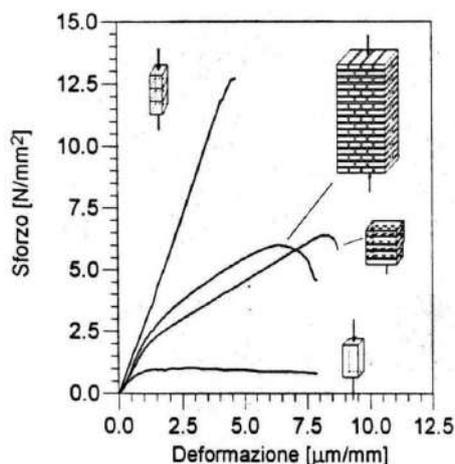


Figura 5 - Confronto tra il comportamento della muratura e quello dei suoi componenti [Binda et al., 1996]

Se si mette a confronto il comportamento meccanico dei singoli componenti con quello globale della muratura «risulta chiara la difficoltà di correlare i parametri dei materiali con quelli del composto. Infatti, dal momento che le prove dirette sui prismi di muratura sono costose, risulterebbe molto più comodo ottenere i parametri della muratura da quelli dei suoi componenti mediante opportune formule di calibrazione» [Binda et al., 1996].

L'insieme di tipologie è così vasto che il termine stesso di *muratura* non è definibile in maniera univoca. Diventa quindi indispensabile raggrupparle in categorie per poter inquadrare facilmente le proprietà meccaniche. Una prima generica classificazione può essere fatta sulla base del materiale, e cioè effettuare una distinzione tra murature in pietra (ampiamente diffuse nell'edilizia storica), murature in laterizio e murature miste. A seguire, la classificazione della muratura viene effettuata considerando la disposizione dei blocchi nel piano e nella sezione. La misura diretta delle caratteristiche meccaniche della muratura avviene mediante l'esecuzione di prove *in situ* su porzioni di muratura, o di prove in laboratorio su elementi indisturbati prelevati

in situ, ove questo sia possibile. Le prove possono essere di compressione e di taglio, scelte in relazione alla tipologia muraria e al criterio di resistenza adottato per l'analisi, e le modalità di prova e la relativa interpretazione dei risultati devono seguire procedure di riconosciuta validità.

A livello normativo, all'interno della Circolare 2019, esplicativa delle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 [Circolare 2019], si riporta in tabella C8.5.1 il comportamento delle tipologie murarie più ricorrenti. In essa si possono trovare indicazioni non vincolanti sui possibili valori dei parametri meccanici, identificati attraverso il rilievo degli aspetti costruttivi e relativi alla muratura stessa. Questa distinzione non segue nessuno specifico standard, ma si riferisce a delle indicazioni di carattere qualitativo e descrittivo. Un metodo per l'individuazione della tipologia muraria a cui ricondurre la muratura in esame è essere quello relativo al calcolo dell'indice di qualità muraria (IQM), poi correlabile ai parametri meccanici della muratura [Borri et al., 2019], come verrà descritto al paragrafo 2.4.3.

2.4 VALUTAZIONE QUALITÀ MURARIA

Nello studio di un edificio storico è importante considerare le caratteristiche della muratura. Si deve tenere conto, infatti, che il riconoscimento e la valutazione delle caratteristiche meccaniche delle murature di edifici esistenti risulta uno degli aspetti fondamentali al fine della valutazione della sicurezza strutturale. Nell'analisi di una muratura è importante tenere conto della regolarità degli elementi resistenti, della loro forma e dimensione, della regolarità della sezione muraria e della presenza di materiali eterogenei. Occorre perciò avere una valutazione di *qualità muraria*.

Il metodo preso in considerazione per l'analisi della qualità muraria è il Metodo dell'Indice della Qualità Muraria (IQM) detto anche Metodo dei Punteggi [Borri et al., 2019]. A questo metodo si aggiunge una valutazione quantitativa tramite la Linea di Minimo Tracciato (LMT) in prospetto [Doglioni et al., 2003], che permette di valutare l'ingranamento sul piano esterno del paramento.

A seguito della valutazione della qualità muraria è opportuno procedere con l'identificazione delle caratteristiche meccaniche della muratura, individuando con analisi visiva a quale categoria la muratura in esame appartiene in riferimento alla tabella C8.5.1 riportata al Capitolo 8 della Circolare 2019.

2.4.1 Metodo di valutazione I.Q.M.

Il metodo IQM si propone di valutare la qualità della muratura e di ottenere un indice numerico che misura la capacità del pannello murario di resistere alle azioni che lo sollecitano. L'oggetto di studio del metodo IQM è il pannello murario considerato isolato, 1m x 1m. Il metodo si basa sull'analisi sistematica dei fattori di maggiore importanza per determinare la risposta di una muratura alle sollecitazioni, i cosiddetti parametri della "*regola dell'arte*". La "*regola dell'arte*" è l'insieme di tutti quegli accorgimenti costruttivi derivanti dalla pratica millenaria che, se eseguiti

durante la costruzione di un muro, ne garantiscono un buon comportamento e ne assicurano la compattezza ed il monolitismo [Binda et al., 2009a].

Gli accorgimenti costruttivi che saranno presi in considerazione, e che nel loro insieme costituiscono la regola dell'arte, sono di seguito elencati:

- a. **Qualità della malta (M.A.)**
La malta regolarizza il contatto tra le pietre e ripartisce le azioni in modo uniforme. Se di buona qualità assicura una resistenza di natura coesiva alla muratura. Tale resistenza può essere significativa se vengono meno gli altri parametri della regola dell'arte in grado di garantire la monolicità del muro.
- b. **Presenza di diatoni (P.D.)**
I diatoni, essendo pietre passanti in tutto lo spessore della muratura, impediscono la suddivisione della parete in più paramenti costituiti uno a ridosso dell'altro permettendo la distribuzione del carico su tutto lo spessore del muro.
- c. **Forma degli elementi resistenti (F.EL.)**
Si tratta di un parametro importante perché più regolare è la forma degli elementi, più si attivano le forze d'attrito in grado di resistere a sollecitazioni orizzontali complanari.
- d. **Dimensione degli elementi resistenti (D.EL.)**
Elementi resistenti di grandi dimensioni rispetto allo spessore del muro assicurano un buon grado di monolicità della parete.
- e. **Sfalsamento dei giunti verticali (S.G.)**
Una muratura di buona qualità ha giunti verticali sfalsati, in quanto, tale caratteristica permette il cosiddetto *effetto catena* che fornisce un buon ingranamento tra gli elementi e dunque una resistenza a trazione.
- f. **Orizzontalità dei filari (O.R.)**
Questo parametro consiste nell'avere "letti di malta" il più possibile orizzontali, che comportano una buona distribuzione dei carichi verticali in quanto si ottiene un vincolo di appoggio regolare. L'orizzontalità dei filari assume un ruolo importante anche in presenza di azioni sismiche poiché consente l'oscillazione attorno a cerniere cilindriche orizzontali evitando il danneggiamento della muratura.
- g. **Resistenza degli elementi (R.EL.)**
Questo è il parametro fondamentale per ottenere una buona muratura. Si deve evitare che gli elementi siano deboli, costituiti da mattoni fortemente forati o che siano degradati.

Su tali parametri si è chiamati ad esprimere un giudizio che può essere di "rispetto" (R.), "parziale rispetto" (P.R.) o di "non rispetto" (N.R.) (Tabella 2). Per alcuni parametri è possibile anche ricorrere ad una valutazione oggettiva tramite semplici misurazioni geometriche. Fra questi assume particolare importanza la valutazione dell'ingranamento nel piano della parete ed in senso trasversale tramite il concetto di "*Linea di Minimo Tracciato*" (LMT) [Binda et al., 2009a].

Poiché i parametri della *regola dell'arte* influiscono in maniera diversa sulla risposta del muro a seconda della direzione dell'azione che sollecita il pannello, l'IQM sarà distinto in:

- IQM_V per azioni verticali,
- IQM_{FP} per azioni orizzontali fuori piano
- IQM_{NP} per azioni orizzontali nel piano

Tabella 2 – Punteggi [Borri et al., 2019]

PARAMETRO	AZIONI VERTICALI (IQM _V)			AZIONI ORIZZONTALI FUORI PIANO (IQM _{FP})			AZIONI ORIZZONTALI NEL PIANO (IQM _{NP})		
	NR	PR	R	NR	PR	R	NR	PR	R
O.R.	0	1	2	0	1	2	0	0,5	1
P.D.	0	1	1	0	1,5	3	0	1	2
F.EL.	0	1,5	3	0	1	2	0	1	2
S.G.	0	0,5	1	0	0,5	1	0	1	2
D.EL.	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
MA.	0	0,5	2	0	0,5	1	0	1	2
R.EL.	0,3	0,7	1	0,5	0,7	1	0,3	0,7	1

A seconda, quindi, che il parametro risulti rispettato, parzialmente rispettato o non rispettato si ottiene per ogni direzione dell'azione un punteggio, calcolato come in eq. (1):

$$IQM = RE.EL. \times (O.R. + P.D. + F.EL. + S.G. + D.EL. + M.A.) \quad (1)$$

In tal modo, si ottengono i tre valori cercati, ovvero gli IQM distinti in base alla direzione dell'azione sollecitante: IQM_V per le azioni verticali, IQM_{FP} per le azioni orizzontali fuori piano e IQM_{NP} per le azioni orizzontali nel piano.

Attraverso tali valori si ha la possibilità di classificare la muratura in esame in una “categoria” che definiamo A, B o C (Tabella 3) avendo così una classificazione, seppur sommaria, della sua qualità meccanica.

Tabella 3 - Valori IQM [Borri et al., 2019]

TIPO DI AZIONE	CATEGORIA MURATURA		
	C	B	A
AZIONI VERTICALI (IQM _V)	0 ≤ IQM _V < 2,5	2,5 ≤ IQM _V < 5	5 ≤ IQM _V ≤ 10
AZIONI ORIZZONTALI FUORI PIANO (IQM _{FP})	0 ≤ IQM _{FP} ≤ 4	4 < IQM _{FP} < 7	7 ≤ IQM _{FP} ≤ 10
AZIONI ORIZZONTALI NEL PIANO (IQM _{NP})	0 ≤ IQM _{NP} ≤ 3	3 < IQM _{NP} < 5	5 ≤ IQM _{NP} ≤ 10

Da una muratura di categoria A ci si può attendere un buon comportamento strutturale; da una muratura di categoria B un comportamento di media qualità e, infine, da una muratura di

categoria C ci si attende una risposta alle sollecitazioni insoddisfacente e quindi disgregazione muraria [Borri et al., 2019].

Per azioni verticali:

- una muratura di categoria A difficilmente subisce lesioni significative;
- una muratura di categoria B può lesionarsi, ma con scarsa probabilità di collassare;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di lesionarsi, di andare fuori piombo e, in situazioni di carico elevato, di collassare.

Per azioni orizzontali fuori piano:

- una muratura di categoria A è in grado di mantenere un comportamento monolitico; ha una probabilità molto bassa di lesionarsi o di collassare per azioni fuori piano se le pareti sono ben collegate fra loro e ai solai. Le verifiche per meccanismi di collasso possono essere svolte ipotizzando un comportamento monolitico delle pareti;
- una muratura di categoria B non è in grado di mantenere un comportamento monolitico ed è probabile avere lesioni o spancamenti in caso di sisma, ma è difficile che collassi se è ben collegata agli orizzontamenti ed ai muri di spina. Le verifiche per meccanismi di collasso possono essere svolte, in favore di sicurezza, ipotizzando che la muratura sia formata da due paramenti distinti e non efficacemente connessi;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di disgregarsi in caso di sisma; per essa è probabile il collasso, a prescindere dai collegamenti (comunque inefficaci, data la cattiva qualità muraria). Le verifiche per meccanismi di collasso risultano irrealistiche ed improponibili, non essendo rispettata l'ipotesi di monolicità delle porzioni murarie costituenti i cinematici.

Per azioni orizzontali nel piano:

- una muratura di categoria A ha scarsa probabilità di lesionarsi;
- una muratura di categoria B, in caso di sisma, ha buone probabilità di lesionarsi, specialmente se le pareti sono sottili o se sono insufficienti rispetto all'area coperta dall'edificio; tuttavia, tali lesioni saranno di entità limitata;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di lesionarsi, ed in modo rilevante, nel piano delle pareti.

2.4.2 Metodo di valutazione L.M.T.

Questo secondo metodo è un metodo quantitativo, che permette di valutare l'ingranamento sul piano esterno del paramento oggetto di studio.

LMT significa "*Linea di Minimo Tracciato*" [Doglioni et al., 2003] e viene valutata sul paramento murario. La LMT è un parametro che riassume in sé tutti gli elementi che determinano l'ingranamento: orizzontalità dei filari, sfalsamento dei giunti verticali, presenza di zeppe, presenza di orizzontamenti.

La LMT è un parametro che, anche in questo caso, viene valutato in una porzione di muratura di 1m x 1m ed è costituito dal tracciamento delle linee più brevi che attraversano verticalmente la

porzione di muratura passando, senza intersecarsi, attraverso i giunti di malta. La media delle loro lunghezze fornisce il valore della LMT su quella faccia della parete. Più elevata è la LMT e maggiore sarà l'ingranamento del supporto, quindi migliore qualità costruttiva e minore vulnerabilità della muratura.

Si propone, per la valutazione dell'ingranamento del paramento, un indicatore a cinque livelli di riferimento, così come riportato in Tabella 4.

Tabella 4 - Livelli LMT [Binda et al., 2009a]

LIVELLI PREVISTI			
M5	Muratura superiore	di elevata qualità costruttiva	bassa vulnerabilità
M4	Muratura medio superiore	efficiente e ben costruita	vulnerabilità limitata
M3	Muratura media	di media efficienza e qualità costruttiva	vulnerabilità media
M2	Muratura medio inferiore	scarsamente efficiente e/o di mediocre qualità costruttiva	vulnerabilità accentuata
M1	Muratura inferiore	non efficiente e/o di cattiva qualità costruttiva	vulnerabilità accentuata

Ogni livello previsto viene descritto nel seguente modo [Binda et al., 2009a]:

- La *muratura superiore* (livello 5) presenta le più elevate qualità costruttive, in genere proprie delle grandi opere, con tessiture a forte ingranamento sul piano e trasversale, malte di allettamento e nel nucleo che assumono a riferimento l'*opus caementicium* di tradizione romana e perciò di elevate caratteristiche adesivo-coesive. In tali contesti il quadro fessurativo dovuto ad azioni orizzontali, se presente, si manifesterà con lesioni concentrate e non ramificate, dovute ad un comportamento marcatamente a blocco rigido, e non devono essere presenti evidenti interventi di trasformazione e fenomeni di degrado. Si tratta quindi di murature ben costruite e ben conservate.
- La *muratura medio-superiore* (livello 4) può essere individuata sia da una muratura di elevata qualità che ha subito fenomeni di parziale degrado, dissesto o trasformazione, sia da una muratura ben conservata ma con caratteristiche costruttive inferiori al massimo standard per almeno un parametro significativo: minore ingranamento, minori pur se elevate caratteristiche della malta, ecc.
- La *muratura di livello medio* (livello 3) può essere sia una muratura di qualità che ha subito accentuati fenomeni di degrado, dissesto, trasformazione, sia una muratura ben conservata con caratteristiche di ingranamento e qualità delle malte non ottimali. Le lesioni, se presenti, si manifesteranno con ramificazioni e bracci paralleli non eccessivamente articolati, ed il comportamento tenderà a svilupparsi con discretizzazione in blocchi di ridotte dimensioni, con zone intermedie di plasticizzazione-disgregazione.

- La *muratura di livello medio-inferiore* (livello 2) può essere costituita da una muratura di maggiore qualità che ha subito accentuati processi di degrado, dissesto, trasformazione, oppure da una muratura ben conservata di ridotte caratteristiche costruttive, con ingranamenti limitati, separazione tra paramenti nel nucleo, malte di ridotte caratteristiche meccaniche ed adesivo-coesive. Le lesioni, ove presenti, tenderanno a presentarsi con assetto fortemente ramificato discretizzando in piccoli blocchi la muratura, e con ampie zone di plasticizzazione-disgregazione. Il comportamento disgregativo prevale su quello a meccanismi e formazione di blocchi, a fatica riconoscibile.
- La *muratura di livello-inferiore* (livello 1) può essere costituita da una muratura di qualità media o medio inferiore che ha subito accentuati e diffusi fenomeni di degrado, dissesto e trasformazione, oppure da una muratura povera largamente al di sotto della regola dell'arte per ingranamento, con separazione del nucleo dai paramenti, qualità meccaniche ed adesivo-coesive delle malte del tutto inadeguate (malte che si tolgono a mano senza attrezzi dall'allettamento, che si schiacciano manualmente polverizzandosi, ecc.). I quadri di dissesto presenteranno ampie deformazioni plastiche, lesioni diffuse con enucleazione dei singoli conci dalla malta, senza che sia più possibile.

Per determinare il livello a cui appartiene la muratura in esame è necessario valutare la lunghezza della LMT in prospetto. A seconda lunghezza in centimetri della Linea di Minimo tracciato, la muratura apparterrà ad un livello, a cui corrisponde un certo gradi di ingranamento e una certa vulnerabilità. In Tabella 5 vengono riportati i valori di riferimento:

Tabella 5 - Livelli di ingranamento per LMT [Binda et al., 2009a]

LIVELLI DI INGRANAMENTO PER LMT		
da 100 a 115 cm	livello 1	M1
da 116 a 130 cm	livello 2	M2
da 131 a 145 cm	livello 3	M3
da 146 a 160 cm	livello 4	M4
oltre 161 cm	livello 5	M5

2.4.3 Correlazione di IQM con i parametri meccanici della muratura

Al fine di determinare una correlazione tra gli indici IQM e i valori meccanici della muratura proposti dalle Norme Tecniche delle Costruzioni [NTC 2018] sono state considerate le diverse tipologie murarie previste dalla Circolare 2019 in tabella C8.5.1 (Figura 6), riferendosi a murature esistenti e non consolidate [Borri et al., 2019].

Tipologia di muratura	f	τ_0	f_{v0}	E	G	w
	(N/mm ²) min-max	(N/mm ²) min-max	(N/mm ²) -	(N/mm ²) min-max	(N/mm ²) min-max	(kN/m ²)
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbazzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Figura 6 – Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura [Circolare 2019]

Per ciascuna di esse sono noti i valori minimi e massimi dei seguenti parametri:

f = resistenza media a compressione;

τ_0 = resistenza media a taglio (per tutte le murature);

f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (solo per murature regolari);

G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale;

E = valore medio del modulo di elasticità normale.

Questi parametri si possono, dunque, mettere in relazione con i diversi IQM (in particolare IQM_V e IQM_{NP}). Ogni correlazione è analizzata nei confronti del valore minimo, medio e massimo del parametro meccanico considerato.

Si procede dunque con le seguenti correlazioni [Borri et al., 2019], visibili da equazioni (2) a (16), dove x corrisponde rispettivamente a IQM_V o a IQM_{NP}.

IQM_V con i valori di f (x = IQM_V)

$$f_{\min} = 1,036e^{0,1961x} \quad (2)$$

$$f_{\text{med}} = 1,4211e^{0,1844x} \quad (3)$$

$$f_{\max} = 1,8021e^{0,1775x} \quad (4)$$

IQM_{NP} con i valori di f_{v0} (x = IQM_{NP})

$$f_{v0 \min} = 0,03x^{0,9093} \quad (8)$$

$$f_{v0 \text{ med}} = 0,0475x^{0,8536} \quad (9)$$

$$f_{v0 \max} = 0,0654x^{0,8219} \quad (10)$$

IQM_{NP} con i valori di τ_0 (x = IQM_{NP})

$$\tau_{0 \min} = 0,0003x^2 + 0,0066x + 0,0143 \quad (5)$$

$$\tau_{0 \text{ med}} = 0,0005x^2 + 0,0086x + 0,0189 \quad (6)$$

$$\tau_{0 \max} = 0,0006x^2 + 0,0107x + 0,0234 \quad (7)$$

IQM_{NP} con i valori di G (x = IQM_{NP})

$$G_{\min} = 1,036e^{0,1961x} \quad (11)$$

$$G_{\text{med}} = 1,4211e^{0,1844x} \quad (12)$$

$$G_{\max} = 1,8021e^{0,1775x} \quad (13)$$

IQM_v con i valori di E ($x = \text{IQM}_v$)

$$E_{\min} = 599,03e^{0,1567x} \quad (14)$$

$$E_{\text{med}} = 731,51e^{0,1548x} \quad (15)$$

$$E_{\max} = 863,74e^{0,1535x} \quad (16)$$

I valori ottenuti possono essere dunque confrontati con i parametri meccanici della muratura citati in precedenza [Circolare 2019] al fine di attribuire alla muratura in analisi una tipologia muraria.

2.5 INDAGINI *IN SITU*

La classificazione delle indagini è dettata dal loro grado di invasività e dalla tipologia di risultato fornito. In relazione alla natura dei risultati, le indagini sperimentali si possono suddividere tra analisi da eseguire in situ e analisi in laboratorio (schema in Figura 7). Le prime possono coinvolgere l'intero manufatto o una porzione di esso, sono di tipo qualitativo o quantitativo e forniscono stime più o meno precise dei parametri geometrici e meccanici locali o globali. Le seconde, invece, vengono eseguite su campioni prelevati dalla struttura e sono utili per l'individuazione dei parametri di input da utilizzare nei modelli di calcolo, soprattutto nelle valutazioni di capacità portante. Tra le analisi in laboratorio si fa riferimento, ad esempio, al prelievo di malta e successivo studio, che verrà descritto ai paragrafi 2.6 e segg. Le indagini, infatti, soprattutto per quanto riguarda la muratura storica, possono essere svolte sui materiali che compongono le murature o sulle murature stesse.

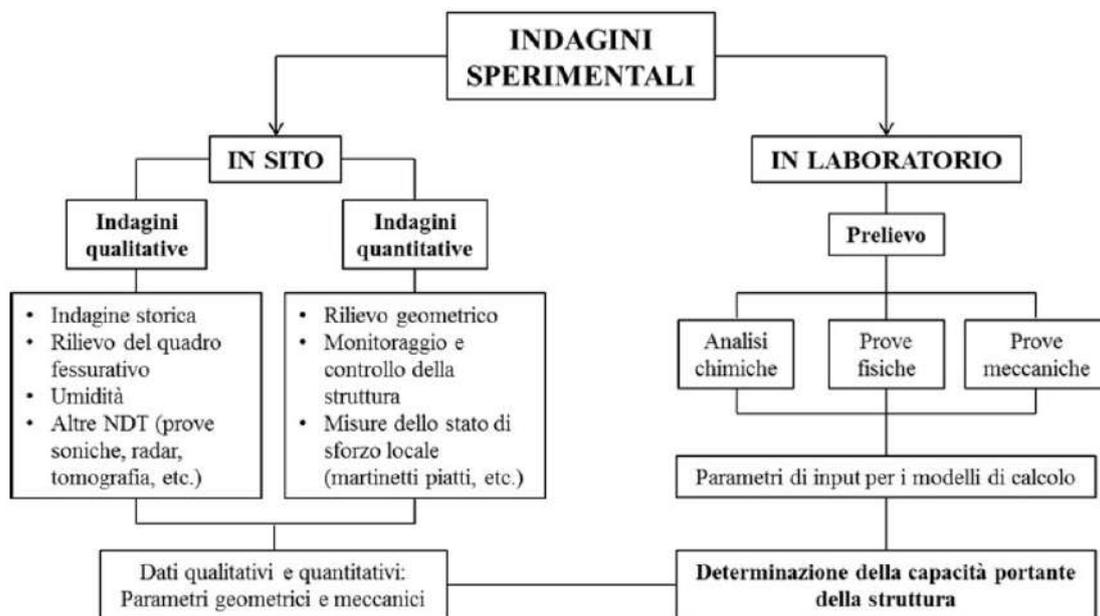


Figura 7 - Indagini sperimentali [Valluzzi, 2019]

Un'altra classificazione delle indagini può essere fatta a seconda della loro invasività e del danno comportato dall'esecuzione della prova stessa. Si possono distinguere tre tipologie di prove, riportate in modo schematico in Figura 8:

- Prove distruttive (DT);
- Prove debolmente distruttive (MDT);
- Prove non distruttive (NDT).

Generalmente, ad una maggiore distruttività della prova corrisponde un dato quantitativamente più preciso, mentre ad una prova non distruttiva segue un dato più qualitativo. Per avere una maggiore affidabilità nello svolgimento delle prove si svolgono solitamente più indagini in modo accoppiato. Nello specifico, le prove distruttive causano rotture gravi e irrecuperabili e sono utili per la caratterizzazione meccanica, chimica e fisica di materiali e porzioni murarie.

Le indagini che rientrano nella categoria di prove debolmente distruttive provocano distruzioni molto limitate. A causa del loro carattere locale, queste forniscono risultati precisi ma non sempre generalizzabili.

Le indagini eseguite con prove non distruttive sono molto importanti nel campo del restauro e della conservazione del bene in quanto sono prove che garantiscono il minimo grado di invasività, non arrecando alcun danno al manufatto o ai suoi componenti. Le informazioni che si possono ottenere da questa categoria di indagini sono limitate e molto spesso di carattere qualitativo. La correlazione di questi risultati con valori quantitativi, generalmente più indicativi delle caratteristiche murarie, è abbastanza complessa.

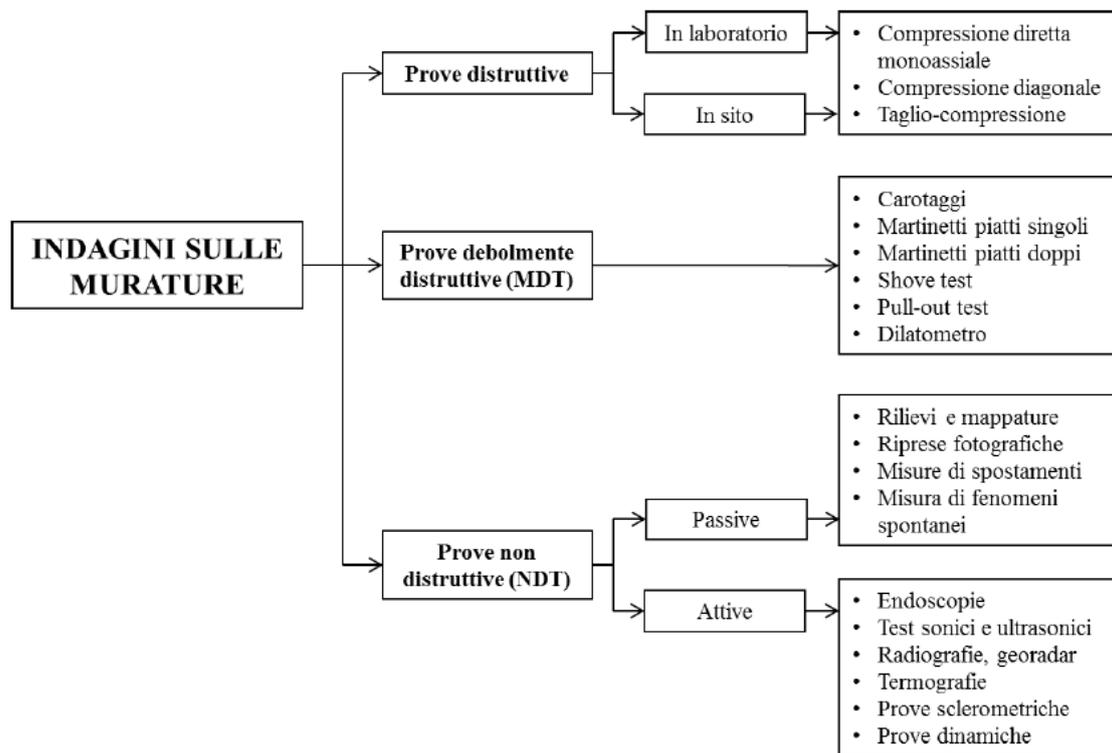


Figura 8 - Indagini sulle murature [Valluzzi, 2019]

Di seguito vengono descritte nello specifico alcune di queste prove, in relazione al loro utilizzo sul caso studio della Basilica di San Benedetto a Norcia.

2.5.1 Prove soniche

La tecnica di indagine sonica è una prova non distruttiva che si basa sulla trasmissione di impulsi meccanici all'interno della muratura da investigare. Gli impulsi presentano delle frequenze che viaggiano nel campo del suono (20-2000Hz) e per questo sono detti sonici. Per eseguire la prova viene utilizzato un martello strumentato che, battendo sul supporto murario, genera l'onda. Quest'ultima viene ricevuta da un sensore, detto accelerometro piezoelettrico, che viene posto a contatto con la muratura. A seconda della posizione dei sensori riceventi la prova sonica viene definita:

- diretta o in trasparenza;
- indiretta o superficiale;
- tomografia.

La scelta di una o un'altra metodologia di acquisizione dipende da vari fattori, tra i quali per primo si può citare l'accessibilità sui lati della muratura e il tipo di muratura [Cescatti et al., 2015].

Le prove soniche dirette, o in trasparenza, consistono nell'emissione e ricezione dell'onda in punti corrispondenti nelle due facce opposte della muratura in esame, fornendo quindi dei dati abbastanza significativi per quanto riguarda la consistenza della sezione muraria. L'esecuzione di questa tipologia di prova prevede l'utilizzo di un solo accelerometro per ricevere il singolo impulso generato dal martello.

Le prove soniche indirette (o superficiali), al contrario, trasmettono e ricevono l'onda sonora dallo stesso lato della muratura. Ne consegue che le informazioni ricavate da questa seconda tipologia di prova siano più limitate al solo strato più superficiale della muratura e non al suo intero spessore.

Le prove soniche tomografiche si effettuano disponendo una serie di accelerometri sulla faccia opposta rispetto alla superficie di battitura. La prova prevede, quindi, l'utilizzo contemporaneo di una serie di accelerometri, generalmente disposti in una riga verticale o orizzontale, per l'acquisizione dell'impulso generato dal martello: con un'unica battuta è dunque possibile ottenere parametri relativi ad una più vasta porzione della sezione muraria. In Figura 9 è possibile vedere le griglie di acquisizione per la prova sonica diretta e per la tomografia.

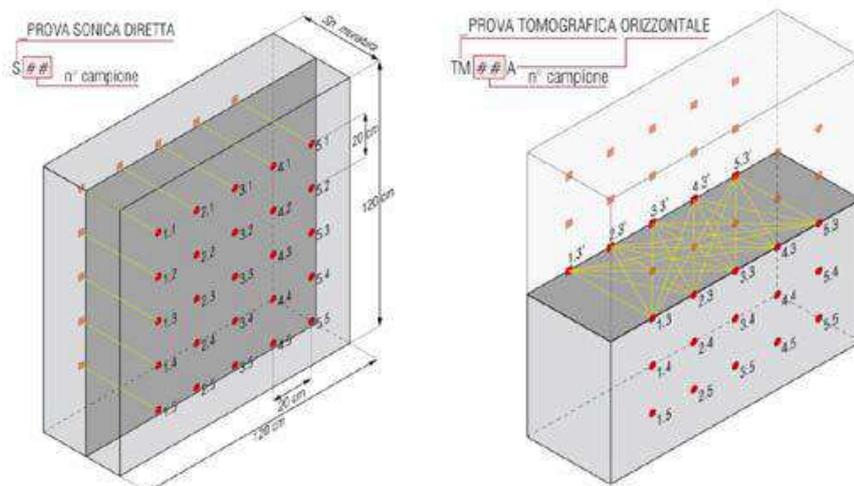


Figura 9 - Griglia di acquisizione per prova sonica diretta (sx) e prova sonica tomografica (dx) [Cescatti et al., 2015]

La prova si basa sul principio secondo il quale esistono delle relazioni tra la velocità di propagazione delle onde elastiche all'interno della muratura con le proprietà della muratura stessa. Conoscendo, infatti, la distanza tra il punto di trasmissione e quello di ricezione e l'intervallo di tempo che impiega il segnale ad attraversare il mezzo è possibile risalire alla velocità di diffusione dell'onda e, di conseguenza, ricostruire l'ipotetica distribuzione della densità interna della muratura [Cescatti et al., 2015].

La relazione che lega la velocità di propagazione delle onde elastiche che attraversano un mezzo alle proprietà fisico-meccaniche del mezzo stesso è descritta dall'eq. (17):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (17)$$

Dove: v = velocità di propagazione delle onde longitudinali nel mezzo attraversato;
 E = modulo di Young (rigidezza del materiale);
 ρ = densità del mezzo attraversato.

Questa relazione è valida solo per materiali elastici, omogenei (a densità costante) ed isotropi (con le stesse proprietà fisico-meccaniche in tutte le direzioni) e quindi in generale non valida per la propagazione di onde meccaniche nella muratura, mezzo fortemente eterogeneo ed anisotropo. Nelle murature, soprattutto quelle storiche, si ottengono risultati più *qualitativi* che *quantitativi* e l'onda sonica non può essere, dunque, direttamente correlata alle proprietà della muratura. Tuttavia, alcuni lavori hanno dimostrato che, per una data tipologia muraria, si può individuare una relazione abbastanza marcata tra i valori di velocità delle onde soniche e il modulo di elasticità della muratura [Modena et al., 1997]. Le prove soniche applicate alla muratura, in compenso, permettono di individuare la presenza di vuoti, di difetti e variazioni della tipologia muraria o la presenza di eventuali lesioni. Questo perché l'onda sonica si trasmette più velocemente laddove il mezzo è più denso, individuando quindi lacune o discontinuità, data la consistente diminuzione della velocità in corrispondenza di vuoti. Si ritiene, inoltre, opportuno effettuare indagini soniche laddove sulla muratura siano stati eseguiti degli interventi di consolidamento in quanto si possono verificare delle variazioni di consistenza della muratura verificando dunque i cambiamenti delle caratteristiche fisiche dei materiali.

2.5.2 Carotaggi

L'ispezione diretta della muratura è la tecnica più indicata per l'analisi della morfologia muraria. A volte questa può essere condotta semplicemente asportando alcuni mattoni o blocchi di pietra e rilevando e fotografando la sezione interna del muro. In altri casi, invece, è necessario effettuare dei carotaggi profondi in alcune zone rappresentative della struttura.

Il carotaggio è una tecnica di indagine locale che consiste nella perforazione della muratura con appositi strumenti, detti carotatori, e nell'estrazione di campioni, detti carote (Figura 10), che consentono il riconoscimento della stratigrafia del muro e l'individuazione della sua

composizione. Questa tecnica è ampiamente utilizzata nelle indagini delle murature nonostante abbia come limite l'impossibilità di ottenere campioni integri. Ciò è dovuto alle vibrazioni indotte dallo strumento di perforazione e al dilavamento della malta causato dall'acqua iniettata durante il prelievo della carota. Per tale motivo le valutazioni sull'effettiva qualità e sulla consistenza del materiale originario sono spesso difficoltose [Rosato, 2014]. Le perforazioni si rivelano utili anche per l'ispezione delle murature a mezzo di endoscopi che consentono la visione diretta della sezione.

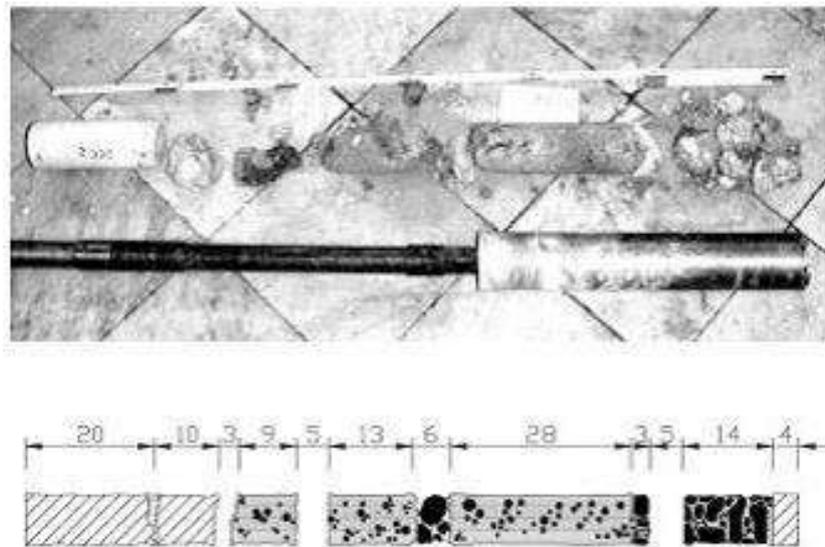


Figura 10 – Prelievo e ricostruzione geometrica di una carota [Binda et al., 2003]

2.5.3 Prove endoscopiche

L'endoscopia consiste nell'ispezione degli strati più interni della muratura, altrimenti inaccessibili, attraverso dei fori passanti in essa praticati (solitamente si sfruttano quelli realizzati con i carotaggi). A tal scopo si possono utilizzare sistemi ottici di tipo rigido, costituiti da obiettivi e lenti tradizionali (boroscopi), o di tipo flessibile, formati da fibre ottiche (Figura 11). In entrambi i casi, gli apparecchi includono anche un sistema di illuminazione ed un oculare esterno che, abbinato ad una camera fotografica, consente la registrazione delle immagini [Rosato, 2014].



Figura 11 – Immagine endoscopio (sinistra) e immagine tratta da video-endoscopia su foro di carotaggio (destra)

Le indagini endoscopiche permettono di ottenere informazioni in merito alle caratteristiche strutturali delle murature (spessore, morfologia e composizione interna) e alla presenza e dimensione di fessure e/o vuoti. Questi parametri sono utili per la valutazione degli eventuali interventi da eseguire e, in particolar modo, sono importanti per stimare l'opportunità di intervenire o meno tramite iniezioni. Nonostante la prova possa sembrare abbastanza invasiva (è necessaria l'esecuzione di fori nella struttura), essa viene catalogata come una prova non distruttiva in quanto, nella maggioranza dei casi, le cavità utilizzate sono quelle già precedentemente ottenute per mezzo di carotaggi.

2.5.4 Georadar

L'indagine radar consiste nella emissione e ricezione di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza (10 MHz – 2 GHz) da parte di un'antenna appoggiata sulla superficie della struttura in corrispondenza dei punti da esaminare. Questo metodo di indagine geofisico viene indicato con il termine *Georadar* o *GPR (Ground Penetrating Radar)* e viene classificata come una prova non distruttiva.

Attraverso l'uso di questo metodo è possibile effettuare diverse operazioni di indagine, tra le quali la ricerca di elementi strutturali nascosti in murature portanti e orizzontamenti o l'individuazione di tessiture murarie nascoste da intonaci e affreschi. Per quanto riguarda invece interventi di consolidamento è possibile mediante indagine georadar controllare l'efficacia delle iniezioni o ancora, nel tema della conservazione dell'edificio, è possibile individuare la presenza di difetti, fessure, vuoti ed inclusioni di materiali diversi o l'individuazione della morfologia delle sezioni in murature a più paramenti.

L'indagine si basa sul principio secondo il quale un flusso di energia elettromagnetica viene alterato dagli oggetti incontrati lungo il suo percorso e che, tale alterazione, può essere rilevata attraverso degli echi di ritorno. Nel caso specifico della muratura, gli impulsi sono riflessi dalle interfacce presenti tra materiali aventi proprietà elettromagnetiche differenti (costante dielettrica o conducibilità) [Da Porto et al., 2020].

La velocità di propagazione delle onde GPR (v) dipende dalla permittività dielettrica relativa del mezzo ϵ_r entro cui il segnale si propaga, espressa dall'eq. (18).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (18)$$

Dove: c = velocità di propagazione nelle onde del vuoto
 Quest'ultima è valutata come da eq. (19):

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 0,3 \text{ m/ns} \quad (19)$$

Dove: ϵ_0 = permittività dielettrica del vuoto;
 μ_0 = permittività magnetica del vuoto.

Dall'eq. (18) si deduce che v sarà sempre inferiore o uguale a c e sarà tanto più piccola quanto maggiore è la permittività dielettrica relativa del mezzo. Quest'ultima è ricavata mediante la formula in eq. (20):

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (20)$$

Dove: ε = permittività assoluta del mezzo;
 ε_0 = permittività dielettrica del vuoto.

La permittività dielettrica relativa ε_r varia tra 1 (in aria) e 81 (in acqua). Dalla permittività dielettrica dipende anche il coefficiente di riflessione del GPR.

La lunghezza d'onda del segnale GPR è espressa dalla formula in eq. (21):

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (21)$$

Dove: λ = lunghezza d'onda del segnale;
 v = velocità di propagazione dell'onda;
 f = frequenza.

La riflessione dell'impulso radar avviene alle interfacce fra mezzi che hanno impedenza elettromagnetica (Z) diversa, la cui formula, per bassi valori di conduttività σ , si può approssimare come espresso dall'eq. (22).

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (22)$$

Dove: μ = permittività magnetica;
 ε = permittività dielettrica.

L'antenna radar (Figura 12), in configurazione classica, è costituita da due dipoli affiancati aventi rispettivamente funzione di trasmissione e ricezione degli impulsi. Trascinando lo strumento sulla muratura da indagare si ottengono delle sezioni che esprimono l'andamento dei segnali ricevuti in funzione del tempo. L'immagine grafica, detta *radargramma* (Figura 12), prodotta dagli echi riflessi è quindi una sezione piana del mezzo irradiato in cui l'asse orizzontale rappresenta il tragitto coperto dall'antenna lungo la superficie esterna della muratura, mentre quello verticale rappresenta i tempi necessari all'onda per coprire lo spazio di andata e ritorno tra la superficie esterna e le zone di discontinuità che hanno provocato le riflessioni [Da Porto et al., 2020].

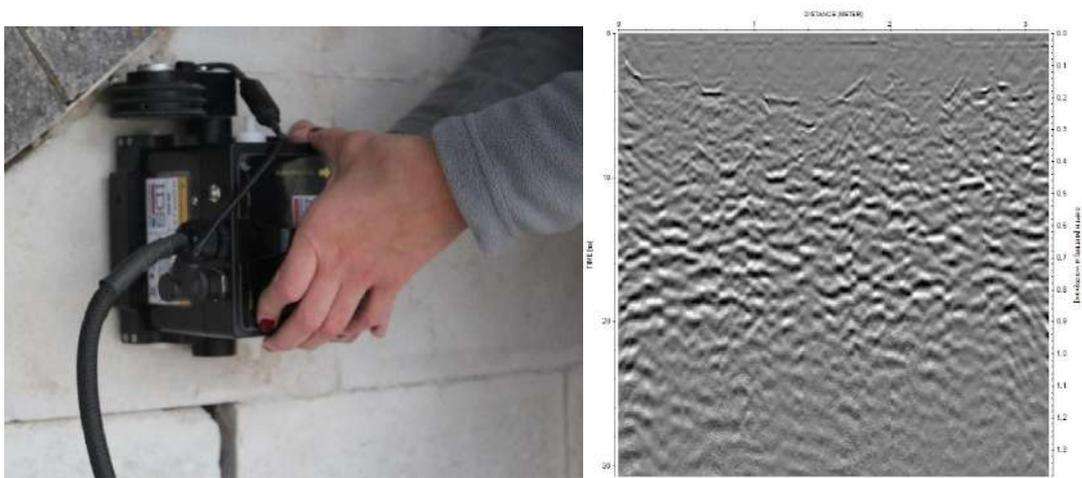


Figura 12 - Antenna radar (sinistra) e radargramma (destra)

Ripetendo le misurazioni a intervalli regolari lungo un determinato profilo, si ottengono immagini radar 2D. Eseguendo più profili 2D paralleli ed elaborando i dati è possibile produrre anche immagini radar 3D. Misurando il tempo necessario affinché gli impulsi attraversino tutta la sezione e siano captati dall'antenna ricevente come echi di ritorno, e conoscendo la velocità di propagazione del segnale nel mezzo, è teoricamente possibile determinare la posizione dei singoli ostacoli. Nel caso specifico della muratura, essendo un mezzo altamente disomogeneo, la valutazione della velocità di propagazione è però molto complessa perché influenzata dai cambiamenti di materiale e dalla presenza di vuoti o di zone di umidità.

La profondità di investigazione del GPR è inversamente proporzionale alla frequenza dell'antenna utilizzata, mentre il dettaglio dell'indagine (risoluzione) è proporzionale alla frequenza dell'antenna. In base alle frequenze delle antenne utilizzate, le applicazioni Georadar si possono suddividere in due grosse categorie: la prima riguarda le prospezioni geologiche e prevede l'utilizzo di antenne con frequenze comprese tra 10 MHz e 400 MHz, adatte, quindi, ad esplorazioni più profonde o che non richiedono particolare dettaglio. La seconda categoria riguarda invece le indagini GPR poco profonde, pertanto prevedono l'utilizzo di antenne con frequenze comprese tra 400 MHz e 2 GHz, per problemi ingegneristici, l'archeologia, i beni culturali e per tutte le indagini che necessitano di un'elevata risoluzione [Da Porto et al., 2020]. Dal tipo di frequenza utilizzata dipendono inoltre parametri quali l'attenuazione e la dispersione del segnale, motivo per cui, per un corretto utilizzo del *Georadar* è necessario programmare le misure in base ai fattori che entrano in gioco in ogni specifica campagna di misura. Una dettagliata definizione preliminare del problema sta, infatti, alla base di una corretta impostazione dell'indagine e di una buona riuscita della stessa.

Al fine di evidenziare le riflessioni di interesse ed interpretare correttamente le reali forme ad esse associate, la profondità e le caratteristiche delle strutture investigate, dopo l'acquisizione è necessario effettuare un processing dei dati, che consente inoltre di eliminare o quantomeno, ridurre il rumore sul segnale ed ottenere una più chiara lettura dei cosiddetti *orizzonti* di interesse. La fase di *processing* dei dati può comportare semplici operazioni di normalizzazione e

filtraggio, mentre nei casi più complessi è necessario applicare particolari filtri ed algoritmi, con operazioni che richiedono una notevole esperienza da parte dell'operatore.

2.6 PRELIEVI DI MALTA

La caratterizzazione degli elementi costituenti può essere eseguita *in situ* o su campioni di piccole dimensioni, prelevati e successivamente analizzati in laboratorio. In riferimento alle malte, possono essere eseguite prove sclerometriche e penetrometriche oppure anche analisi chimiche su campioni di malta che sono stati prelevati in profondità in modo tale da non essere soggetti al degrado superficiale.

In seguito al loro prelievo *in situ*, è possibile eseguire diverse analisi in laboratorio al fine di determinarne la loro composizione mineralogica ed eseguire uno studio microstrutturale e microchimico.

2.6.1 Analisi mineralogica in diffrazione ai raggi X delle polveri (XRDP)

La diffrazione ai raggi X delle polveri è una delle tecniche più utilizzate ed efficaci per l'identificazione e l'analisi quantitativa delle fasi, in particolare nello studio di campioni multifase, quali le malte.

L'analisi quantitativa delle fasi (QPA) tramite diffrazione dei raggi X da materiali policristallini costituisce una delle applicazioni di maggiore interesse in molti settori. L'idea di utilizzare l'analisi diffrattometrica, non solo per l'identificazione, ma anche per l'analisi quantitativa delle fasi cristalline, nasce e si sviluppa con l'utilizzo del diffrattometro contatore fino ad arrivare ad una grande diffusione di questi metodi con l'applicazione del *metodo Rietveld*, un metodo basato sulle intensità di picco (*line intensities*) [Rietveld, 1969].

La tecnica di diffrazione ai raggi X delle polveri permette di discriminare le fasi presenti in base alla loro struttura cristallina. La diffrazione dei raggi X è un fenomeno che deriva dall'interazione tra la radiazione incidente e il campione in esame. Infatti, gli elettroni degli atomi investiti dalla radiazione incidente emettono, a loro volta, una radiazione di raggi X di identica lunghezza d'onda λ e frequenza f rispetto al fascio incidente. Il potere diffrondente di un atomo risulta tanto più grande quanto maggiore è il numero di elettroni che ha attorno. Si produrranno raggi diffratti solo per determinate direzioni, lungo le quali le onde diffuse da tutti gli atomi appartenenti ad un medesimo reticolo cristallino interferiscono in modo costruttivo essendo in coincidenza di fase [Klein, 2004].

Le condizioni geometriche che garantiscono il fenomeno della diffrazione sono descritte dalla legge di Bragg, in eq. (23):

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (23)$$

Dove: d = distanza interplanare;
 θ = angolo di incidenza;
 n = ordine della riflessione;
 λ = lunghezza d'onda.

Tale relazione rappresenta la diffrazione come una riflessione discontinua dei raggi X di lunghezza d'onda λ da parte di successioni di piani reticolari equispaziati a distanza interplanare d secondo angoli θ d'incidenza rispetto ai piani hkl , così come schematizzato in Figura 13 [Speakman, 2011].

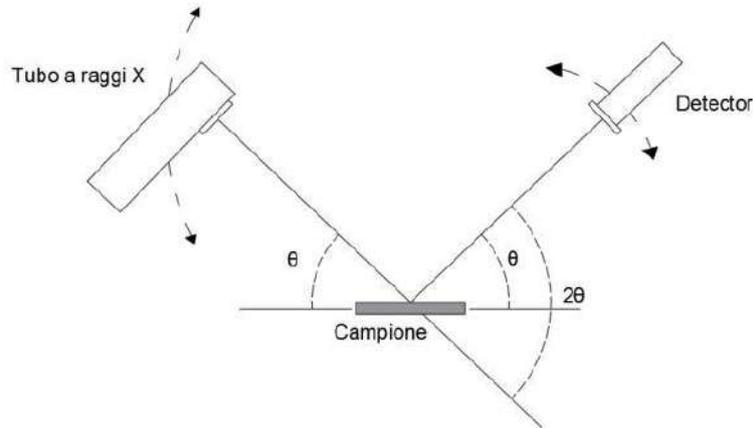


Figura 13 - Schematizzazione della geometria Bragg-Brentano [Speakman, 2011]

Si deve tenere in considerazione che la polvere è un materiale policristallino ideale, cioè è costituito da un insieme di cristalliti in numero molto elevato e distribuiti in modo caotico, la cui dimensione granulometrica deve essere intorno ai 3-4 μm . Ad ogni cristallite è associato un reticolo reciproco, perciò la presenza di infiniti cristalliti, orientati in diverse direzioni, consente di misurare la diffrazione di tutti i piani reticolari simultaneamente, raggiungendo un'elevata rappresentatività. Il campione in polvere viene posto su un porta-campione piatto, o all'interno di un capillare, che compirà una rotazione continua durante la misura [Pistilli, 2016].

Durante l'analisi all'interno del diffrattometro (Figura 14) il campione viene investito da una radiazione X. Gli effetti di diffrazione, prodotti da tutti i piani reticolari alla stessa distanza interplanare d , costituiscono geometricamente una falda conica, che ha come asse del cono la direzione della radiazione incidente e la cui apertura angolare dipende da d . I punti del reticolo reciproco che soddisfano l'equazione di Bragg danno origine a una superficie, la cosiddetta sfera di riflessione, o sfera di Ewald [Speakman, 2011].

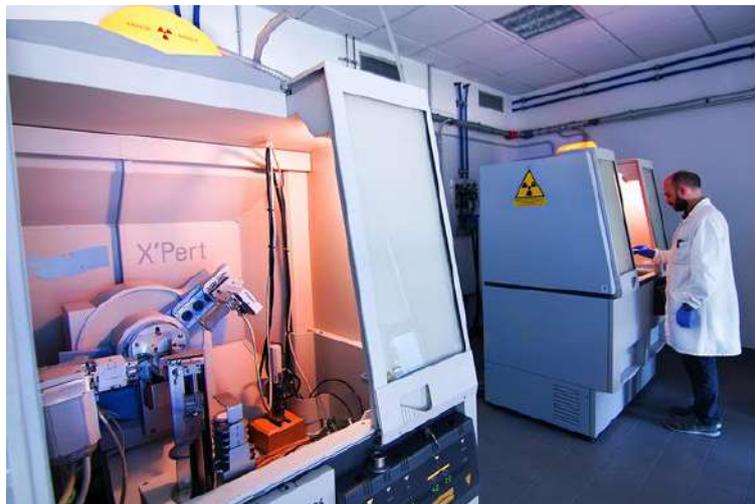


Figura 14 - Diffrattometro PANalytical X'Pert PRO, geometria Bragg Brentano e rivelatore X'Celerator [https://www.geoscienze.unipd.it/diffrattometria-x-polveri]

Quello che si ottiene, mediante l'ausilio di un software di acquisizione dati, è un diffrattogramma, avente in ascissa l'angolo 2θ e in ordinata le intensità misurate degli effetti di diffrazione (Figura 15). Attraverso la tecnica *power diffraction* vengono riconosciuti dei picchi di diffrazione all'interno dei cristalli. Si esaminano tutti i picchi presenti all'interno del materiale e si confrontano con gli *stick pattern*, ovvero la carta d'identità dei minerali, misurandone l'intensità. Picchi maggiori corrispondono ad una maggiore presenza di quel materiale. Ad ogni picco di diffrazione si associa una o più successioni di piani reticolari. Si possono, in questo modo, associare gli angoli di diffrazione di Bragg ai piani reticolari delle fasi cristalline e determinare i parametri di cella elementare per l'identificazione delle fasi presenti [Pistilli, 2016].

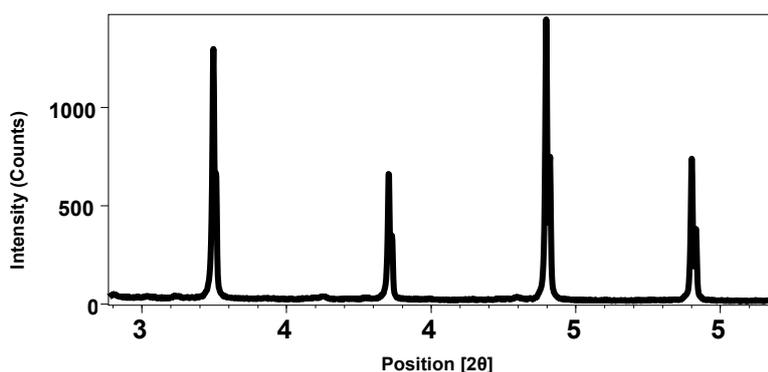


Figura 15 - Diffrattogramma esempio [Speakman, 2011]

2.6.2 Studio del campione in microscopia ottica a trasmissione (TL-OM)

L'analisi petrografica in OM-TL applicata allo studio delle malte consiste nello studio del legante di ciascuno strato presente e dell'aggregato utilizzato per la produzione della malta.

L'analisi petrografica in microscopia ottica si effettua su preparati in sezione sottile, ovvero sezioni di campione dallo spessore di 30 μm incollate su un vetrino.

La descrizione petrografica comprende la caratterizzazione dell'aggregato, della tessitura della matrice (legante), della porosità, della distribuzione granulometrica e del rapporto legante/aggregato. La caratterizzazione petrografica dei campioni viene eseguita rispettando le linee guida per la descrizione macroscopica e microstratigrafica di materiali leganti definite dalla normativa [UNI 11176:2006].

L'osservazione dei campioni avviene con microscopio ottico, costituito da due lenti, il polarizzatore e l'analizzatore, che permettono all'osservatore di eseguire due tipi di analisi [Pistilli, 2016]:

- Nicol paralleli per determinare l'indice di rifrazione, il colore, l'abito cristallino, le fratture e le tracce di sfaldatura dei minerali presenti;
- Nicol incrociati, per l'osservazione dei colori di interferenza, degli angoli di estinzione delle specie mineralogiche birifrangenti, e, sulle sezioni in estinzione perpendicolari all'asse ottico, è possibile determinare le figure di interferenza dall'analisi in conoscopia, inserendo la lente di Bertrand.

2.6.3 Studio microstrutturale e microchimico in microscopia elettronica a scansione con associato sistema di analisi chimica in fluorescenza X a dispersione di energia (SEM-EDS)

L'analisi al microscopio elettronico a scansione (*SEM*), nella caratterizzazione delle malte, permette di determinare il tenore d'idraulicità dei campioni mediante la stima semi-quantitativa delle frazioni in peso degli ossidi di calcio, magnesio, silicio, alluminio e ferro. L'analisi consente, inoltre, di individuare mediante microanalisi chimica le fasi non rilevabili dalla diffrazione quali, ad esempio, le fasi amorfe.

Il microscopio elettronico a scansione (Figura 16) permette di effettuare osservazioni morfologiche di campioni solidi sia organico-biologici sia inorganici. Questa tecnica non sfrutta i fotoni della luce come la microscopia ottica, ma un fascio di elettroni che colpisce il campione. Grazie alla minore lunghezza d'onda degli elettroni rispetto a quella dei fotoni, il potere di risoluzione di un microscopio elettronico risulta essere nettamente superiore rispetto a quello del microscopio ottico. In condizioni ottimali, il potere di risoluzione di un SEM può arrivare fino all'ordine dei nanometri [Fioretti et al., 2009].

Ai SEM possono essere applicati spettrometri sia EDS (*energy dispersive system*) che WDS (*wavelength dispersive system*). Gli EDS sono i più comuni e permettono di eseguire analisi chimiche puntuali grazie alla capacità di ogni elemento di riuscire ad emettere fotoni aventi energie caratteristiche tali da poter essere discriminati e riconosciuti. L'EDS è quindi una tecnica che viene utilizzata per l'analisi chimica elementare. Un detector allo stato solido raccoglie i raggi X uscenti dal campione in studio e li trasforma in impulsi elettrici che saranno proporzionali all'energia dei fotoni X misurati.



Figura 16 - SEM, CamScan MX3000 con sorgente LaB6

[<https://www.geoscienze.unipd.it/laboratori/laboratori/laboratorio-di-microscopia-elettronica-scansione-sem>]

2.7 CALCOLO DEI CINEMATISMI

Negli edifici in muratura spesso avvengono collassi causati dalla perdita di equilibrio di porzioni murarie. Per questo motivo la valutazione della sicurezza degli edifici esistenti in muratura va eseguita oltre che dal punto di vista del comportamento sismico globale, anche considerando i possibili meccanismi locali di collasso. Individuati tali meccanismi è necessario quantificare il coefficiente sismico λ che attiva il cinematismo in questione [Beolchini et al., 2005]. L'approccio cinematico, dunque, permette di determinare l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo.

I più frequenti meccanismi di collasso fuori piano che si riscontrano negli edifici in muratura sono classificati in:

- Meccanismo di ribaltamento semplice;
- Meccanismo di flessione verticale;
- Meccanismo di flessione orizzontale;
- Meccanismo di ribaltamento composto.

Tra tutti i cinematismi presenti in letteratura [ReLuis, 2008; Beolchini et al., 2005] vengono analizzati nello specifico il cinematismo di ribaltamento globale di facciata fuori piano (meccanismo di ribaltamento semplice) e la flessione orizzontale di parete non confinata (meccanismo di flessione orizzontale).

2.7.1 Cinematismo di ribaltamento globale di facciata fuori piano

Il meccanismo del ribaltamento globale di facciata si manifesta attraverso la rotazione rigida di intere facciate o di porzioni di pareti attorno a cerniere cilindriche in prevalenza orizzontali poste alla base del macroelemento, che percorrono la struttura muraria sollecitata da azioni sismiche ortogonali (Figura 17). Il coefficiente di collasso λ che attiva il cinematismo si ottiene facendo il rapporto tra il momento stabilizzante dovuto alla sommatoria dei pesi della muratura, dei carichi verticali (presi con segno positivo) e delle spinte orizzontali (prese negativamente) e il momento ribaltante che invece considera l'azione sismica.

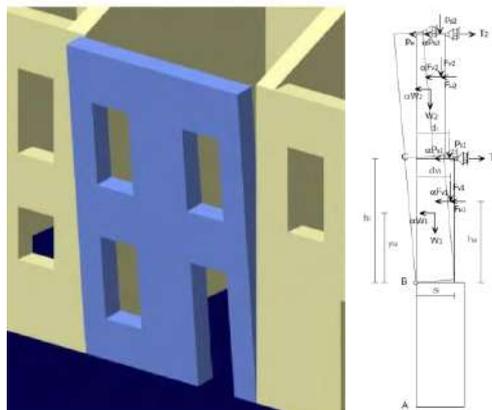


Figura 17 - Ribaltamento globale di facciata fuori piano [ReLuis, 2008]

Il coefficiente λ viene quindi definito dall'equazione (24) come segue [ReLuis, 2008]:

$$\lambda = \frac{\sum W_i \cdot \frac{S_i}{2} + \sum F_{Vi} \cdot d_{Vi} + \sum P_{Si} \cdot d_i + \sum T_i \cdot h_i - \sum F_{Hi} \cdot h_{Vi} - P_H \cdot h_i}{\sum W_i \cdot y_{Gi} + \sum F_{Vi} \cdot h_{Vi} + \sum P_{Si} \cdot h_i} \quad (24)$$

2.7.2 Flessione orizzontale di parete

Nel caso di parete non efficacemente confinata nei riguardi degli spostamenti nel piano il meccanismo di flessione orizzontale è caratterizzato dal rigonfiamento della parete investita dal sisma e dalla rotazione dei muri laterali per effetto della spinta dell'arco orizzontale (Figura 18). Il cinematiso di collasso prevede la formazione di corpi cuneiformi che si separano dalla struttura muraria lungo cerniere cilindriche oblique e verticali che ruotano reciprocamente fino al collasso [Beolchini et al., 2005].

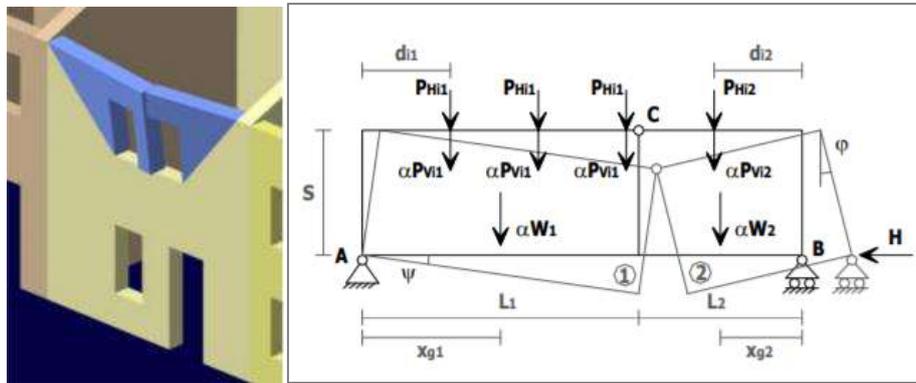


Figura 18 - Meccanismo di flessione orizzontale di parete [ReLuis,2008]

Il coefficiente di collasso λ viene definito dalla formula (25) come segue [ReLuis, 2008]:

$$\lambda = \frac{Hs \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) - \sum P_{Hi1} d_{i1} - \sum P_{Hi2} \frac{L_1}{L_2} d_{i2}}{w_1 x_{g1} + w_2 x_{g2} + \sum P_{Vi1} d_{i1} + \sum P_{Vi2} \frac{L_1}{L_2} d_{i2}} \quad (25)$$

2.8 MODELLAZIONE NUMERICA

Ai fini della valutazione della sicurezza di un edificio storico è spesso necessario un confronto con dei modelli strutturali. Questi ultimi si cominciano ad utilizzare dalla seconda metà del secolo scorso, con l'aumento degli strumenti computazionali, in sostituzione a modelli analitici, a volte molto complessi nella risoluzione [Bacchetto, 2006]. Mediante il confronto con un modello numerico è possibile valutare il comportamento manifestato nella costruzione, accertarlo e verificarlo. La fase di conoscenza gioca un ruolo fondamentale nella corretta definizione del modello stesso.

I metodi di modellazione numerica si distinguono in due grandi gruppi [Jing, 2003]:

- *Metodi al continuo* schematizzano il sistema come un dominio discretizzato in *unità elementari* di forma geometricamente semplice (triangoli, quadrilateri, tetraedri, ecc..) le quali, pur deformandosi, rimangono costantemente in contatto reciproco attraverso le relative superfici di separazione. Il mezzo così composto conserva in tutti i suoi elementi le proprietà osservate nell'insieme. A questo metodo appartiene l'*Analisi a Elementi Finiti (FEM)*, di cui tratteremo nel dettaglio in seguito.
- *Metodi discontinui* rappresentano il sistema come un insieme di corpi discreti e distinti che interagiscono tra loro solo in caso di reciproco contatto. Il comportamento meccanico del mezzo è descritto tracciando l'andamento delle forze che si sviluppano nei punti di contatto ed i movimenti dei singoli elementi che lo compongono. Infatti, mentre nei metodi al continuo i contatti fra *unità elementari* rimangono invariati indipendentemente dalla risposta del modello, in quelli discontinui vengono aggiornati ad ogni iterazione in base alla posizione ed al movimento relativo dei singoli elementi. A questo metodo appartiene l'*Analisi a Elementi Discreti (DEM)*.

2.8.1 Modellazione ad Elementi Finiti (FEM)

Il metodo FEM (*Finite Element Model*) viene applicato in diversi ambiti e si basa sulla soluzione numerica di equazioni di tipo algebrico complesse, riferite agli spostamenti che avvengono nei nodi della struttura. Per far ciò il dominio della struttura viene suddiviso in tanti sottodomini, definiti *elementi finiti*, riducendo così il problema ad un numero finito di incognite. Discretizzando la struttura in un certo numero di elementi finiti si definisce il campo incognito con una serie di funzioni approssimate, dette *funzioni di forma*, ognuna all'interno di ogni elemento [Bacchetto, 2006].

I singoli elementi possono avere forme diverse (triangolari, quadrilateri, esaedri e tetraedri) e possono essere monodimensionali, bidimensionali o tridimensionali. Sono collegati tra loro da dei nodi, detti *punti nodali*. Gli spostamenti di questi ultimi corrispondono ai gradi di libertà della struttura e su di essi si concentrano anche le forze esterne.

Esiste una dualità tra spostamenti e forze esterne, questa è rappresentata dalla relazione (26):

$$\bar{f} = k \cdot \bar{u}$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \dots \\ f_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \dots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (26)$$

Dove: \bar{f} = vettore delle forze esterne;
 k = matrice di rigidezza;
 \bar{u} = vettore degli spostamenti incogniti.

Dato che un'analisi di questo tipo è dipendente dalla scelta degli elementi finiti che compongono il dominio, inteso come la *mesh* in cui viene suddiviso il modello, è evidente che il livello di approssimazione è condizionato dalle scelte di impostazione del modello. In particolare, questo è più preciso all'aumentare del numero di elementi finiti.

Il primo problema per la creazione di un modello è legato all'idealizzazione del problema reale, e quindi alla definizione del modello. Alla base del metodo ci sono diversi passaggi:

- Idealizzazione della struttura e definizione geometrica
- Creazione della *mesh*
- Definizione dei carichi (in termini di spostamenti e forze)
- Impostazioni dei vincoli
- Valutazione delle proprietà del materiale
- Scelta del metodo di soluzione

Di estrema importanza risulta essere la scelta della giusta scala di modellazione che, nel caso specifico della muratura, può anche essere indipendente dalla reale tessitura [Bacchetto, 2006]. Il materiale muratura, come descritto al Capitolo 2.3 presenta un comportamento non lineare in compressione, tensione e taglio e comportamento fragile. Le proprietà meccaniche dell'insieme giunti e blocchi, possono essere rappresentate come un continuo omogeneo caratterizzato da un particolare legame costitutivo.

Esistono diversi *software* che svolgono un'analisi a elementi finiti. Tra questi si cita il *software* DIANA FEA_{BV} a cui si farà riferimento nel proseguo del lavoro di tesi per la modellazione numerica della Basilica di San Benedetto a Norcia.

2.8.2 Legame costitutivo: *Total Strain Based Crack Model*

La descrizione matematica del comportamento del materiale viene definita legame costitutivo. Il legame costitutivo più comunemente usato per rappresentare le proprietà meccaniche della muratura è il *Total Strain Based Crack Model*, presente all'interno del *software* DIANA FEA_{BV}. Il modello è basato sul concetto di deformazione totale (*total strain*), che descrive la tensione in funzione della deformazione. Il concetto alla base del *Total Strain Based Crack Model* è che le sollecitazioni sono calcolate a seconda delle direzioni di frattura e sono previste diverse modalità di propagazione della fessurazione [DIANA FEA_{BV} 2020]. Quando si crea una frattura le tensioni si riducono progressivamente con l'aumentare dell'apertura e tale comportamento viene descritto nel modello da una curva di *softening* (Figura 19). Questa rappresenta la possibilità del materiale di dissipare una certa quantità di energia prima di raggiungere la deformazione ultima. L'energia necessaria a compiere tale lavoro di deformazione è denominata *energia di frattura* G_f e mediante tale definizione il modello riesce a riprodurre il comportamento non lineare del materiale.

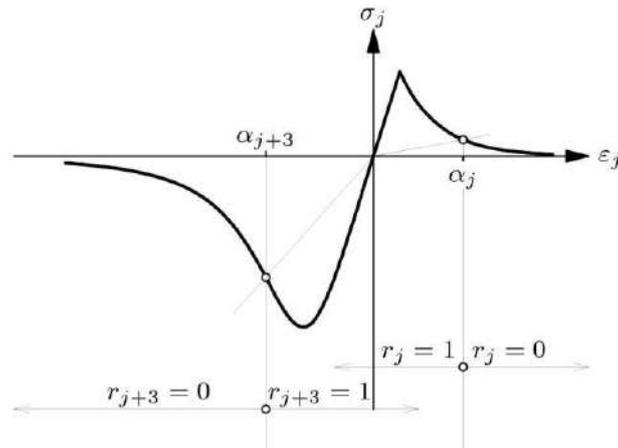


Figura 19 - Modello costitutivo nella condizione di carico e scarico [DIANA FEA_{BV} 2020]

Nell'attuale implementazione in *DIANA FEA_{BV}*, il comportamento di carico e scarico è rappresentato da una legge tensione-deformazione che varia in base allo stato di trazione o compressione. Le possibili tipologie di diagrammi che descrivono il comportamento nei due stati tensionali sono molteplici e possono variare a seconda delle necessità di modellazione, come sarà possibile vedere al paragrafo 8.1.2 nella scelta del diagramma per rappresentare il comportamento a trazione e compressione della muratura.

3. INQUADRAMENTO CASO STUDIO E ANALISI SISMICA DEL TERRITORIO

La Basilica di San Benedetto si trova a Norcia, capoluogo dell'omonimo comune. Il comune di Norcia (Figura 20) è ubicato nella zona Sud-Est dell'Umbria, si tratta di un comune montano, con estensione di circa 275 km² e altitudini che vanno da circa 400 a 2400 m s.l.m.

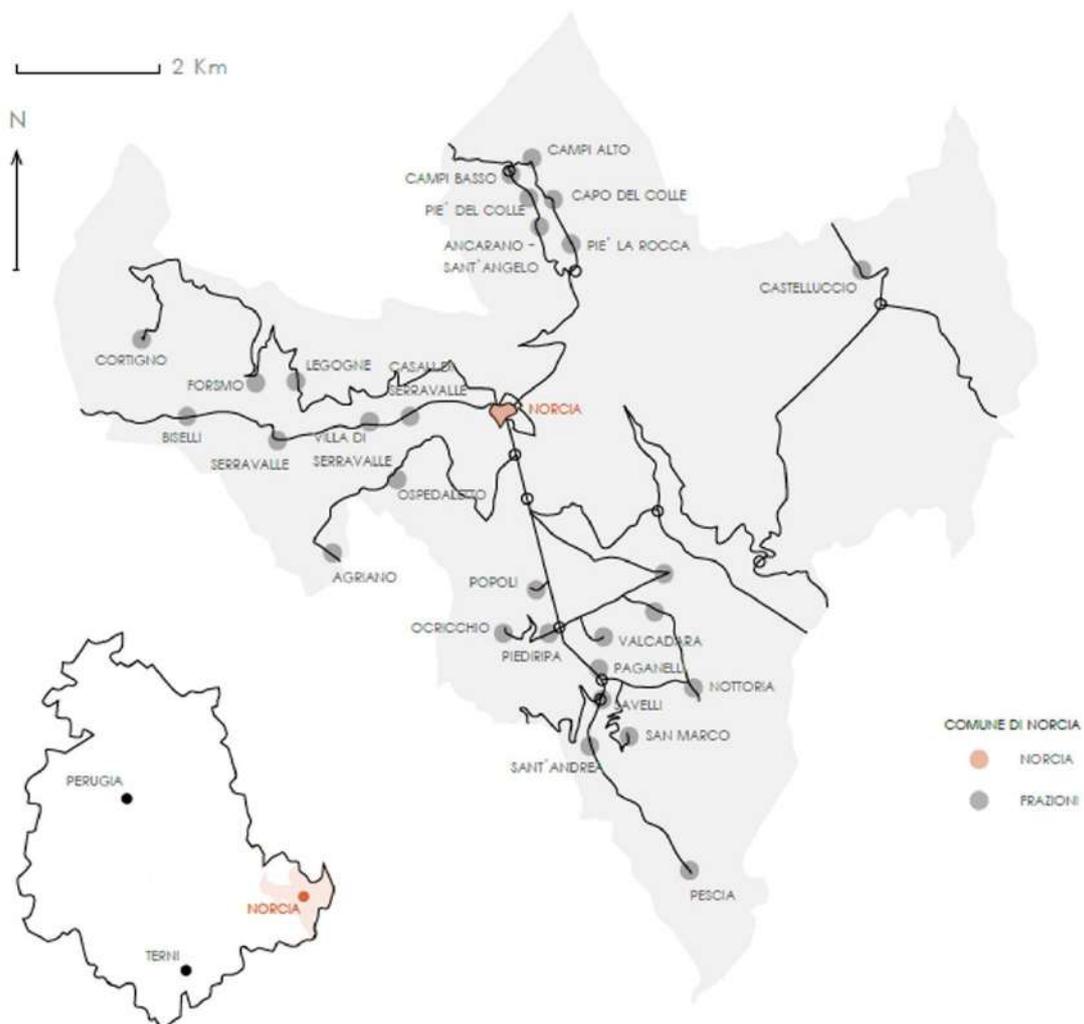


Figura 20 - Inquadramento Comune di Norcia [Angeli, 2019].

L'abitato di Norcia è posizionato nella parte centrale del territorio comunale, ad una quota media di circa 600 m s.l.m., in corrispondenza di un'ampia valle intramontana, detta Piana di Santa Scolastica, di origine tettonica e circondata dai rilievi appenninici.

Norcia era abitata già in epoca pre-romana, come testimoniano le necropoli rinvenute nella Piana di Santa Scolastica e nell'area del Campo Boario. Nel 290 a.C. venne conquistata dai Romani che costruirono attorno alla città la cinta muraria. Le più antiche testimonianze note di occupazione dell'area urbana di Norcia che risalgono all'epoca romana provengono proprio dall'area della piazza dove si trova la Basilica di San Benedetto. Alcune ipotesi ricostruttive del periodo individuano il luogo come area adibita al commercio.

La città di Norcia raggiunse la sua massima espansione nel 1250, diventando libero Comune, non più dipendente dalla città di Spoleto. Nel XIII secolo fu edificata una nuova cinta muraria, sullo stampo di quella romana precedente, a definirne l'attuale assetto della città (come visibile in Figura 21) [Gigliozzi, 2019].

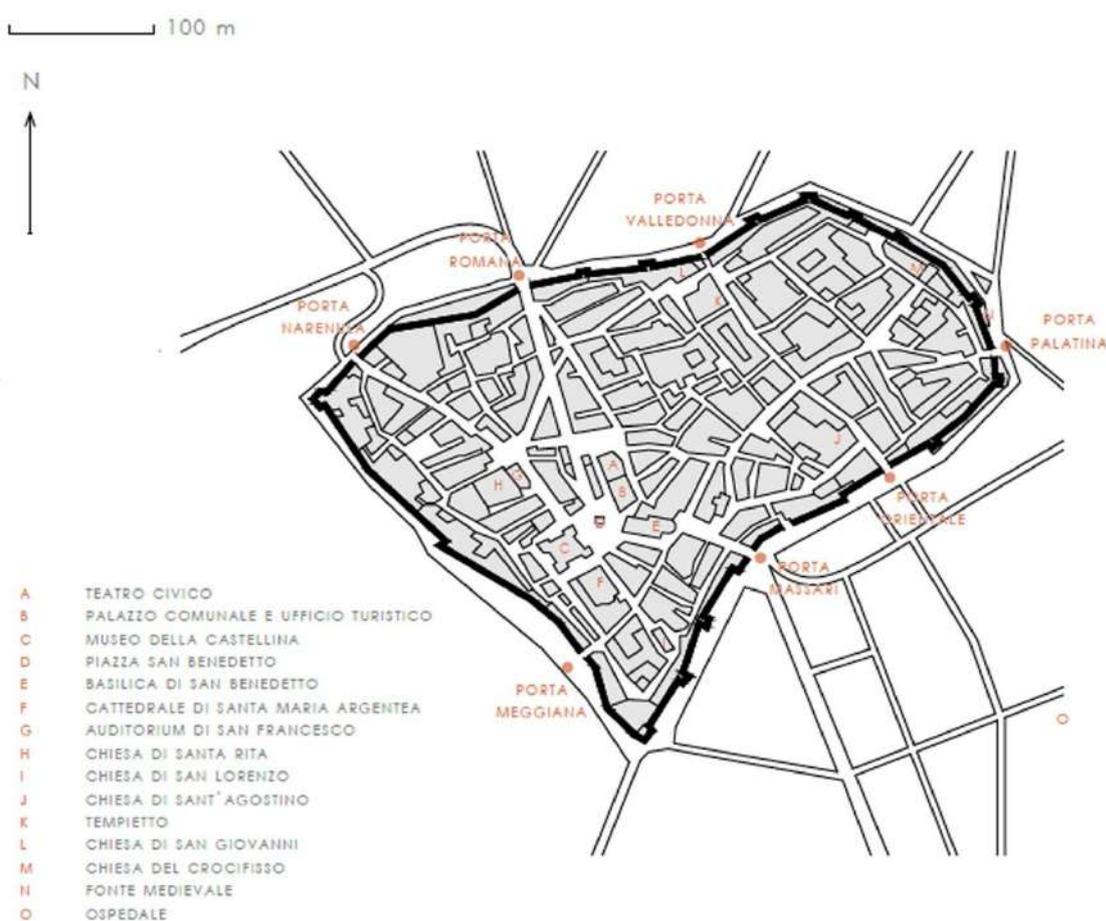


Figura 21 - Città di Norcia [Angeli,2019]

3.1 Sismicità dell'area di studio

La sismicità dell'Umbria, in particolare dell'area appenninica umbro-marchigiana, è ampiamente conosciuta in quanto, sulla base di ricerche condotte da inizio del XX secolo e dei cataloghi sui terremoti avvenuti, oltre che al confronto dei valori di accelerazione massima attesa a_{max} , si fa riferimento ad una delle zone più sismogenetiche della Catena Appenninica. Quest'ultima è divisa in: zona Medio-Marchigiana/Abruzzese, Appennino Umbro e Val di Chiana-Ciociaria, coprendo quasi per intero il territorio regionale. In queste zone la Magnitudo massima attesa raggiunge i valori di 7.06 Mw. La massima magnitudo Richter registrata è oltre 6.5, con una frequenza di terremoti al di sopra del settimo grado della scala MCS di circa 20 eventi per secolo negli ultimi tre secoli [Gruppo di Lavoro, 2004].

Il comune di Norcia è attualmente classificato in *Zona Sismica 1*, ossia di massima pericolosità. Per quanto riguarda la pericolosità sismica di base si fa riferimento alla mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale (Figura 22), espressa in termini di accelerazione massima al suolo (a_{max}), con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, in riferimento a sottosuoli molto rigidi ($V_s > 800$ m/s, Cat. A).

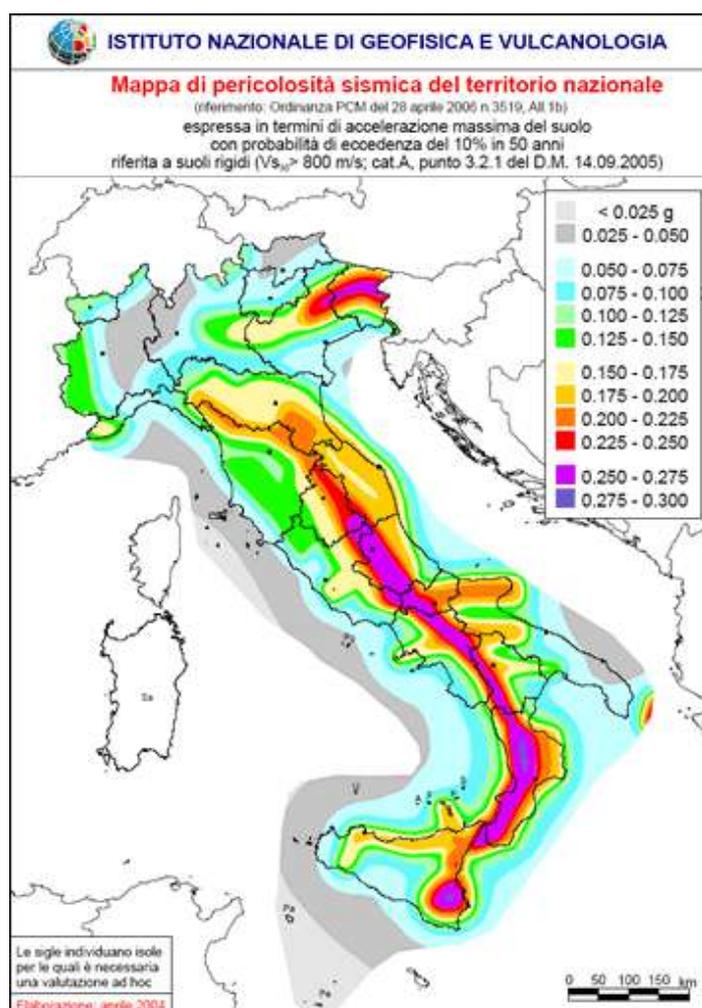


Figura 22 - Mappa di Pericolosità Sismica del Territorio Nazionale [http://zonesismiche.mi.ingv.it]

Per il comune di Norcia sono stati individuati valori di accelerazione massima al suolo (a_{max}) tra i 0,250 g e 0,275 g, come osservato in Figura 23 dall'inquadramento in ambito regionale della mappa di pericolosità sismica.

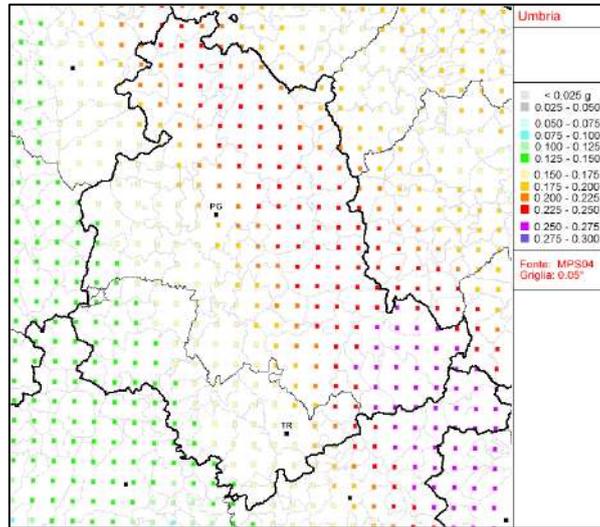


Figura 23 - Mappa di Pericolosità Sismica della Regione Umbria [<http://zonesismiche.mi.ingv.it>]

In particolare, il territorio comunale di Norcia ricade nella zona 923, identificata come Appennino Abruzzese, con una magnitudo massima attesa di 7.06 Mw. I più recenti eventi sismici che si sono verificati dal 24 agosto 2016 fino al 4 dicembre 2017 corrispondono a 72 terremoti di cui l'evento con maggiore magnitudo, pari a 6.5 Mw, è stato rilevato a 5 km a Nord/Est da Norcia il 30 ottobre 2016, data in cui è avvenuto il quasi totale crollo della Basilica di San Benedetto, oggetto di studio in questo lavoro di tesi.

Dal Database Macrosismico Italiano 2015 [DBMI15] dell'INGV-Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, è consultabile la storia sismica del comune di Norcia, nella quale sono riassunti 114 eventi a partire dall'anno 1328. Nel grafico seguente (Figura 24) è possibile osservare la frequenza degli eventi sismici che hanno colpito Norcia e le loro intensità.

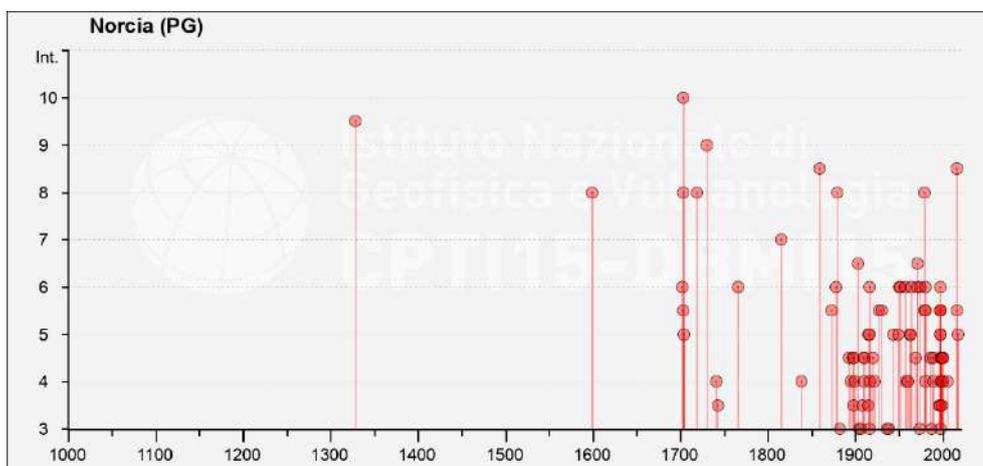


Figura 24 - Intensità degli eventi Sismici Norcia [<http://zonesismiche.mi.ingv.it>]

4. ANALISI STORICO-COSTRUTTIVA

*«TER FUIT HAEC MOLES RAPIDIS COLLAPSA RUINIS
ORDO TER NOSTER CONDITUR AERE SUO»¹*

È ciò che si leggeva nell'iscrizione risalente al 1787, collocata sull'arco absidale della Basilica di San Benedetto. Tale iscrizione ricorda gli interventi settecenteschi eseguiti, specificando come essi rappresentino già una terza ricostruzione della monumentale Basilica [Gigliozzi, 2019]. È proprio a partire dalle numerose catastrofi che la hanno colpita che nei paragrafi successivi viene ripercorsa quella che è la storia della Basilica di San Benedetto, oggetto di numerosi crolli e ricostruzioni parziali e totali che la hanno portata ad essere nel 2016 (Figura 25), data dell'ultimo terremoto che ha nuovamente coinvolto la Basilica, frutto di diverse modifiche e trasformazioni avvenute nel corso dei secoli.



Figura 25 - Basilica di San Benedetto, foto pre-sisma 2016 [Archivio SABAP]

¹ «Per tre volte questo edificio fu distrutto da eventi rovinosi e per tre volte il nostro ordine lo ha rifondato con proprio denaro» [Gigliozzi, 2019].

La Basilica di San Benedetto sorge nell'omonima piazza della città di Norcia. La piazza di San Benedetto conserva traccia delle più importanti vicende storiche della città e racconta la costante contrapposizione tra il potere comunale e il potere ecclesiastico, fonte di cambiamenti, anche urbanistici. La piazza era, dunque, il centro urbano dove si svolgevano anche le attività commerciali e la stessa Basilica rivestiva il ruolo di cappella del Comune, luogo prescelto per le cerimonie ufficiali. La posizione centrale della Basilica di San Benedetto ha reso la chiesa, e il convento benedettino ad essa adiacente, un luogo principe della vita religiosa, sociale ed economica di Norcia, strettamente connesso alle funzioni civiche della città [Comino et al., 2013].

La Basilica di San Benedetto presentava una pianta a croce latina, con navata unica, abside e calotta all'incrocio del transetto (Figura 26). La navata era coperta da capriate lignee, lasciate a vista in seguito alla rimozione del soffitto cassettonato avvenuta dopo gli interventi di restauro del '900. La conformazione spaziale interna è frutto, invece, della ricostruzione settecentesca. All'esterno, adiacente alla parete destra della navata, era presente un portico, detto Portico delle Misure, realizzato nel 1570 come spazio adibito a mercato coperto. Al di sotto della Basilica è presente la cripta, costituita da un ambiente diviso in tre navate e comunicante con la base del campanile.

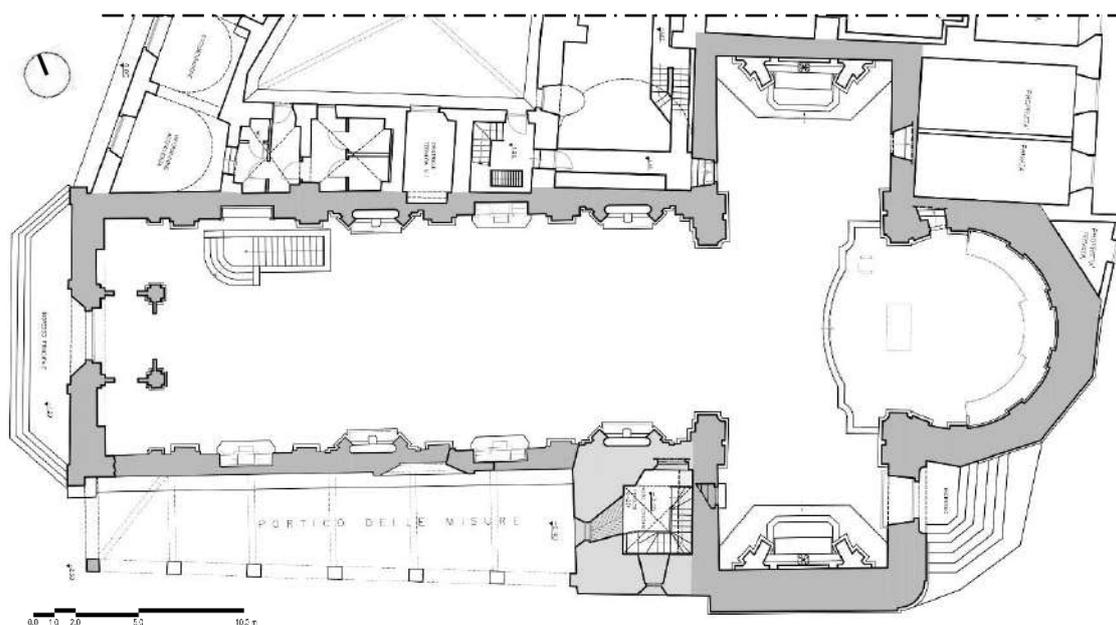


Figura 26 - Pianta della Basilica di San Benedetto, stato pre-sisma 2016

Ad oggi, la Basilica di San Benedetto a Norcia risulta quasi interamente crollata a seguito della sequenza sismica che ha colpito il Centro Italia nel 2016 (Figura 27). Il crollo ha interessato innanzitutto il campanile, elemento estremamente vulnerabile, il cui collasso verso l'interno della Basilica ha comportato la distruzione di tutta la copertura lignea della navata principale e della copertura dei transetti, compresa la calotta all'intersezione. Questi danni si sono estesi alle pareti laterali della navata, comportando il crollo totale del Portico delle Misure e della parete ad esso adiacente e il crollo della parte superiore della parete opposta. La facciata è uno dei pochi elementi che ha resistito al sisma, insieme alla zona absidale e del transetto. Questi elementi sono

stati oggetto di un intervento immediato di messa in sicurezza (Figura 28), al fine di preservarne la loro struttura ed evitarne ulteriori danni.



Figura 27 – Basilica di San Benedetto, foto immediato post-sisma 2016 [Archivio SABAP]



Figura 28 – Basilica di San Benedetto, foto post-intervento di messa in sicurezza [DIP, 2020]

Come verrà trattato al Capitolo 9, è stato realizzato un modello *H-BIM* della Basilica di San Benedetto, che potesse contenere al suo interno quante più informazioni possibili. Tra tutti i dati che sono stati inseriti nel modello, che verranno spiegati nel dettaglio in seguito, vi è quello dell'evoluzione storica della fabbrica. Il modello della Basilica è stato realizzato dapprima sulla base delle piante a disposizione relative a disegni del 1998 [Archivio SABAP]. Da questo modello si è proceduto a ritroso nella ricostruzione della Basilica in termini volumetrici, grazie a ciò che è possibile desumere dallo studio delle documentazioni e dalle fotografie storiche a disposizione. Le immagini ricavate dal modello *H-BIM* realizzato verranno quindi utilizzate nei paragrafi a seguire per un'illustrazione più schematica dell'evoluzione geometrica della Basilica. In Figura 29 è possibile osservare il modello *H-BIM* realizzato in ambiente *Revit* della Basilica di San Benedetto. In esso sono indicate con diverso colore le fasi storiche costruttive che si sono susseguite.



Figura 29 - Modello *Revit* della Basilica di San Benedetto in stato pre-sisma, evoluzione storica

Si andranno dunque a delineare quelli che sono stati i maggiori eventi sismici che hanno portato alla totale o parziale distruzione della Basilica, con conseguente ricostruzione. Nello specifico, si farà riferimento a quattro importanti terremoti che hanno coinvolto l'appennino umbromarchigiano: il primo nel 1328, a seguire quelli del 1703 e 1730 e infine quello del 1859.

4.1 FASE PRE-GOTICA

Secondo la tradizione, la Basilica di San Benedetto è stata fondata sulla casa paterna del Santo, nato attorno al 480. La Basilica, quindi, ha origine su un'area di forte valenza storica e simbolica. Testimonianze materiali hanno confermato un'antica occupazione dell'area, risalente all'epoca romana, grazie alla scoperta di un'estesa area archeologica che si estende al di sotto della Basilica. I primi resti sono rinvenuti in occasioni di alcuni lavori alla cripta iniziati nel 1911 e in data 1929 si ha il primo sopralluogo da parte della soprintendenza. Prima del sisma del 2016 l'area

archeologia era aperta al pubblico, suddivisa in due zone connesse da un tunnel: l'area della cripta vera e propria e porzioni di setti murari, visibili in Figura 30.



Figura 30 - Area scavi archeologici

Tuttavia, nonostante l'antica tradizione di un luogo di culto fondato sui resti del *platinum Sancti Benedicti*, la prima attestazione documentaria di un monastero benedettino a Norcia risale solo al 1115, quando la chiesa appare tra le dipendenze dell'Abbazia di Sant'Eutizio in Valcastoriana [Gigliozzi, 2019].

Come emergerà anche a seguito dello studio dei materiali leganti prelevati *in situ*, sembrano essere presenti delle evidenze materiche di questa fase romanica. Esse sono rappresentate dal materiale di spoglio emerso a seguito degli scavi archeologici del 2000, ma rinvenuto anche a seguito dei sismi del 2016 all'interno delle murature. In modo particolare, può essere ricondotta ad una fase romanica la muratura presente sul muro perimetrale della navata destra, adiacente al Portico delle Misure. In Figura 31 viene colorata la parte di muratura in questione.

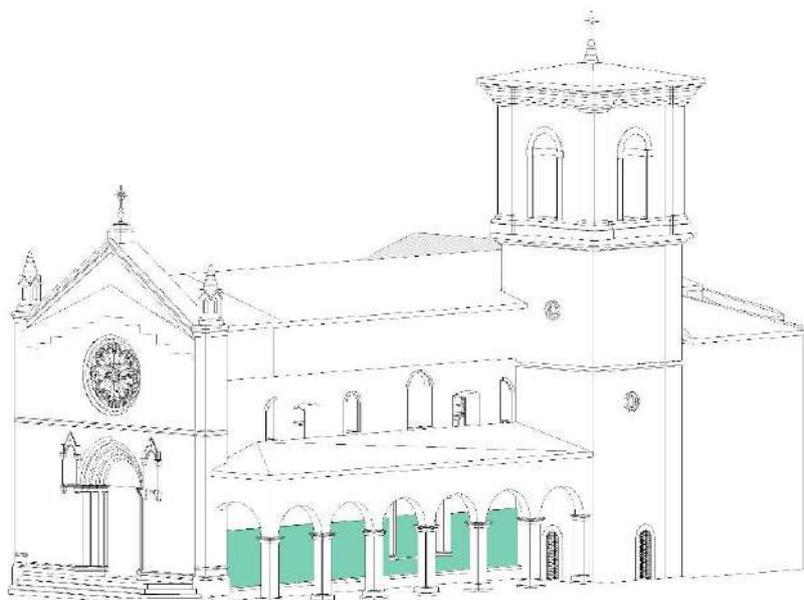


Figura 31 – Modello Revit, individuazione muratura fase pre-gotica

Prima del crollo della Basilica, in questa posizione, si potevano distinguere in modo netto all'interno del Portico delle Misure la presenza di due diverse murature (Figura 32). Alla chiesa di età romanica si attribuisce quindi la porzione di muratura che si eleva per i primi 4 m circa di altezza, caratterizzata da grossi blocchi di reimpiego con una dimensione di 60 cm di base e 40 cm di altezza. Al di sopra, in corrispondenza del punto di imposta delle vecchie volte presenti a copertura del portico, la muratura è chiaramente diversa, costituita da elementi in calcare rosa, appartenenti sicuramente ad un'epoca successiva, probabilmente riconducibile al rifacimento trecentesco.



Figura 32 – Portico delle Misure, individuazione delle due diverse tipologie di muratura [ICCD]

4.2 TERREMOTO 4 DICEMBRE 1328

Nel caso di Norcia, le prime testimonianze di crolli di edifici a seguito di un evento sismico risalgono al 1328 [Bertolaso et al., 2007].

«Il 4 dicembre 1328, verso l’aurora – vale a dire intorno alle 6:15 GMT – un forte terremoto colpì i territori del Ducato di Spoleto e della Marca Anconetana, che sono parte delle odierne regioni Marche e Umbria. I danni più gravi avvennero nella zona collinosa a ovest dei monti Sibillini, nella valle del fiume Nera.

In particolare, subì gravissimi danni Norcia, dove crollarono case, torri, in parte le mura cittadine, palazzi e chiese. [...]» [Guidoboni et al., 2018].

È a seguito di questo sisma che si sviluppa la principale fase costruttiva della Basilica, che si può definire come fase gotica. Punto focale della ricostruzione risulta essere il campanile che, come si legge dall’iscrizione gotica che corre lungo la cornice inferiore, risale al 1388:

«ANNIS MILLENIS CURRENTIBUS ATQUE TRECENTIS BIS QUATTUOR
IU(N)CTIS ISTIS AC OCTUAGINTA [...]»²

² «Negli anni 1388 [...]» [Cordella, 2002]

L'iscrizione visibile in Figura 33 fa presupporre una fase contestuale di lavori anche nella chiesa, iniziati negli anni Settanta e Ottanta del '300 e completati verosimilmente all'inizio del secolo successivo con l'erezione della facciata e della decorazione interna. Solo una situazione fortemente precaria delle strutture avrebbe potuto giustificare la necessità di riedificare gran parte della Basilica in un periodo non certo florido per il monastero nursino. Per questa ragione, è presumibile che il sisma del 1328 avesse causato seri danni al più antico edificio, sia pure non così gravi da impedirne totalmente l'uso [Gigliozzi, 2019].

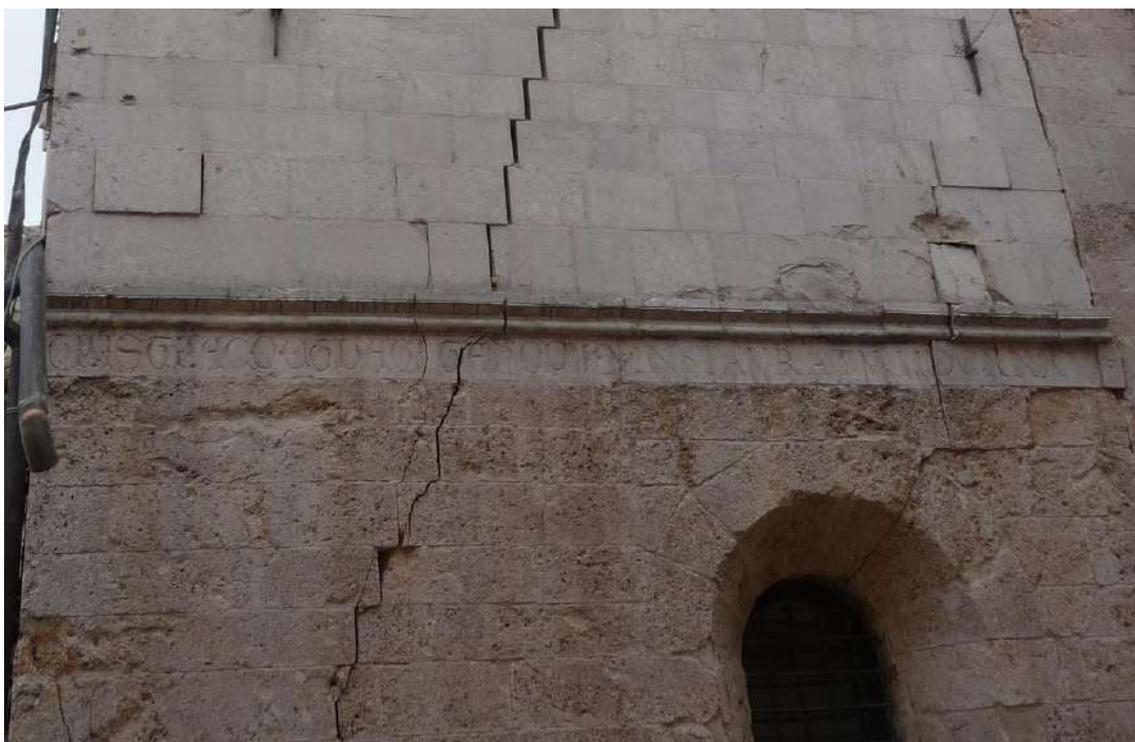


Figura 33 - Iscrizione gotica del campanile [ICCD]

Dalle ricostruzioni storiche un documento [Fondo Reguardati], pertinente alla stima dei lavori di ricostruzione del 1734, descrive il campanile soprattutto per quanto riguarda le dimensioni della vecchia torre gotica:

«Campanile. L'altezza di esso, prima delle rovine, era di palmi 300 e più, tutto di pietra lavorate a scalpello, con intreccio di colonne, piramidi ed altri lavori similmente di marmo, che lo rendevano vago sopra ogni altro della nostra Italia, Ora è rimasto un maschio di palmi 111 altezza, sopra del quale si è fatta la perizia di eriggersi quattro finestroni, o siano archi, da situare le campane e, crescendo l'altezza di palmi 39, sarà il medesimo da cielo a terra altro solamente palmi 150» [Comino et al., 2013].

Considerando che il palmo romano, allora usato anche a Norcia, misura 22,34 cm, ne deriva che il vecchio campanile era alto più di 67 m, contro i 33 m attuali. Esso doveva essere aperto da bifore ed oculi, ornato di colonnette, diviso da cornici marcapiano decorate a rosette e concluso da una guglia piramidale sormontata da una croce ferrea su una palla di rame. La descrizione è

conforme a come viene rappresentato in numerose pitture del XV-XVII secolo. In Figura 34 si riporta il campanile come rappresentato nelle incisioni di G. Lauro del 1635 [Lauro, 1635].

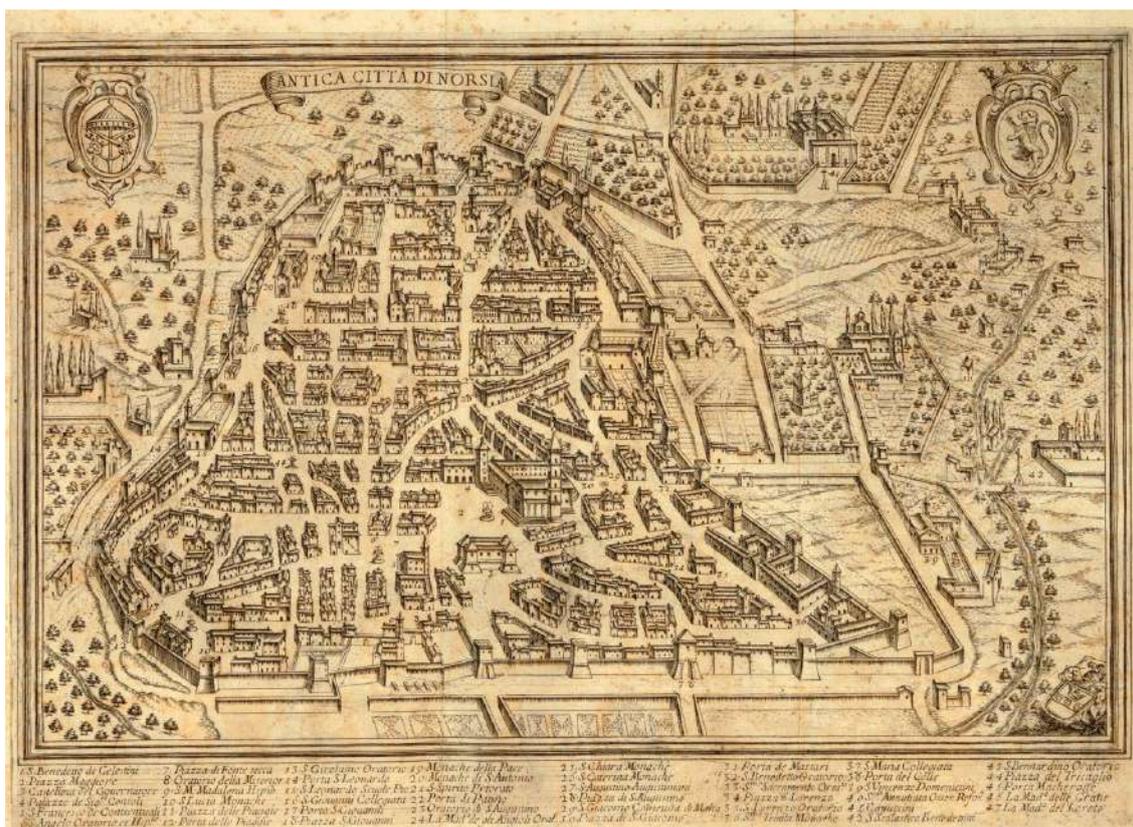


Figura 34 - "L'antica città di Norcia" [Lauro, 1635]

La parte finale dell'iscrizione, aggiunta in epoca più tarda, riporta di un restauro effettuato nel 1635:

«INSTAURATU(M) MDCXXXV³»

Dalla descrizione dei lavori di riparazione si può dedurre che i primi tre tronchi del campanile dovevano essere uguali allo stato attuale, in quanto nei lavori si citano i due finestroni ferrati in basso sui lati della strada e del Portico delle Misure e, più in alto, l'*occhio del campanile* (una delle finestre orbiccolari). Il documento indica anche le pietre da usarsi per il rifacimento del campanile, che si può presumere siano le stesse già impiegate nella costruzione trecentesca. La lanterna, o canestro, doveva un tempo essere molto traforata, con colonnine a torciglione e decorazioni fogliate di stile gotico, e sormontata da una guglia.

Già nel 1557 il campanile minacciava rovina per la sua vetustà [Cordella, 2002]. I primi danni sul campanile si sono avuti a seguito dallo sciame sismico del 1702-1703:

³ «Restaurato nel 1635», [Cordella, 2002]

«Il magnifico ed elevato campanile, lavorato alla gotica, sconcertato dalle scosse lasciò cadere tre grosse campane [...] restando tutto curvo e piegato da una parte, in prossimo stato di cadere» [De Carolis, 1703].

Contestualmente alla realizzazione del campanile si avviarono i lavori riguardanti la parte inferiore della facciata, con il portale gotico strombato con fasci di colonnine e decorazione scultorea a motivi alternati, la lunetta superiore decorata con fregio scolpito con motivi vegetali, l'architrave con sagome di arcatelle in rilievo recante gruppo scultoreo della Madonna col Bambino tra due angeli e la lastra del tetramorfo raffigurante la testa di vitello per san Luca (Figura 35).

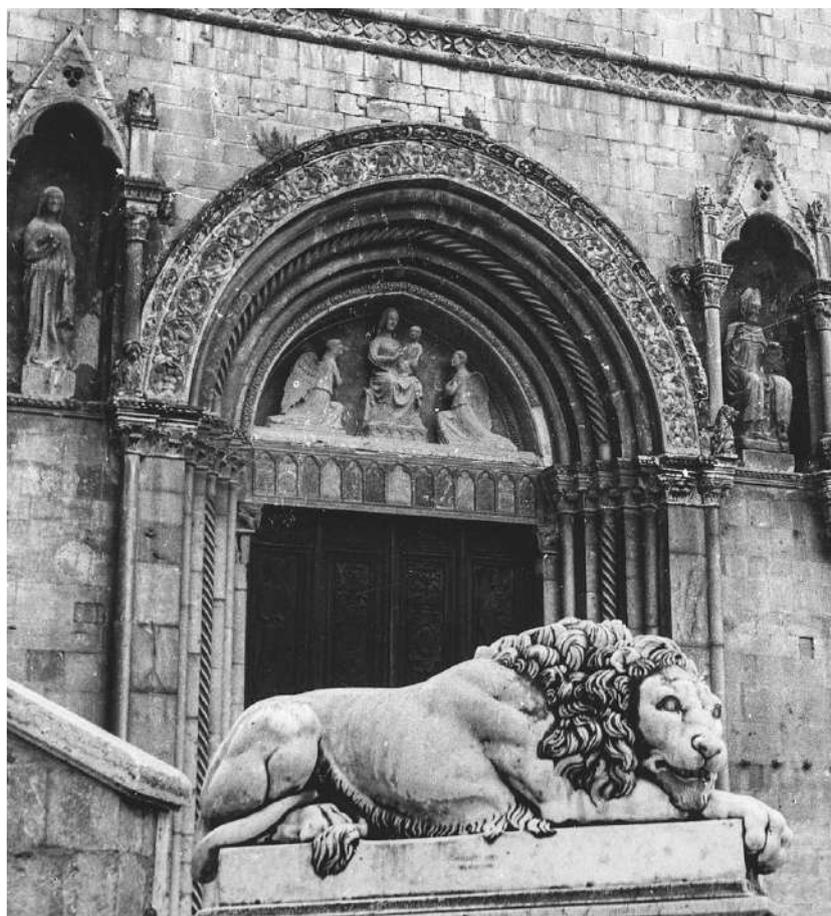


Figura 35 – Facciata della Basilica di San Benedetto [ICCD]

In questa fase era, inoltre, presente un secondo portale di accesso, posto lateralmente in corrispondenza della parete longitudinale destra della navata. Il portale era a sesto acuto, con una decorazione a fasci di colonnine nella strombatura e capitelli scolpiti all'innesto dell'arco. Si può osservare in Figura 36 la differenza di tessitura muraria e dunque il taglio, eseguito con uno *scuci-cuci*, per l'inserimento di tale portone d'ingresso.



Figura 36 - Inserimento portale gotico nella muratura della navata destra [ICCD]

In Figura 37 si può, dunque, osservare la geometria della Basilica di San Benedetto a seguito degli interventi del '300, con una torre che può risultare quasi sproporzionata rispetto alle dimensioni della Basilica stessa. La geometria che si riporta nella modellazione *Revit* è finalizzata alla realizzazione di un modello indicativo in termini di volumi, ragione per cui alcuni dettagli, non avendo a disposizione piante, sezioni o foto dettagliate, sono stati tralasciati.

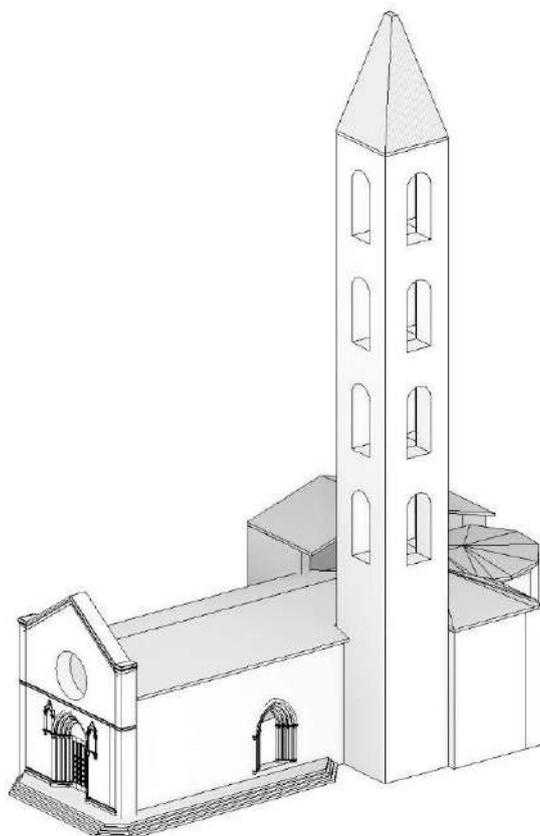


Figura 37 – Modellazione *Revit*, Basilica di San Benedetto a seguito degli interventi del '300

All'interno della Basilica risale sempre alla fase gotica l'arco trionfale a ogiva, rimereso a seguito dei restauri degli anni Cinquanta del XX sec. che hanno interessato in particolar modo la

copertura. In entrambi i lati, a seguito del crollo, sono emerse delle finestre monofore tamponate (Figura 38 e Figura 39), ascrivibili a questa fase. Questo lascia presupporre che non fosse presente, almeno a quella quota, la struttura del convento. Un'ulteriore indicazione a riguardo viene dalla presenza di un'ulteriore finestra tamponata, con stesso linguaggio architettonico e quota, nella zona del transetto sinistro, a contatto con il convento.



Figura 38 - Finestra tamponata, zona transetto sinistro



Figura 39 - Imbotte finestra gotica, parete longitudinale lato convento

Nel XVI secolo la Basilica di San Benedetto si lega maggiormente alla collettività con la costruzione nel 1570 di un portico addossato alla parete longitudinale destra della navata (Figura 40 e Figura 41), per volontà del Comune e delle autorità ecclesiastiche. Lo scopo era quello di creare una sorta di mercato coperto dei cereali. Il portico era costituito da sei fornici a tutto sesto e venne denominato Loggia dei Mercanti o Portico delle Misure: il nome deriva dai recipienti in pietra, le cosiddette misure, qui collocate in occasione della sua costruzione [Cordella, 2002]. Con la sua realizzazione venne chiuso l'ingresso laterale realizzato nella fase gotica e sopra descritto.

Sempre a questa fase storica vengono ricondotte alcune modifiche alla facciata relative al rosone centrale e alla decorazione superiore, oltre ai pinnacoli. Nel 1578 vengono collocate le statue dei santi Benedetto e Scolastica in apposite nicchie.

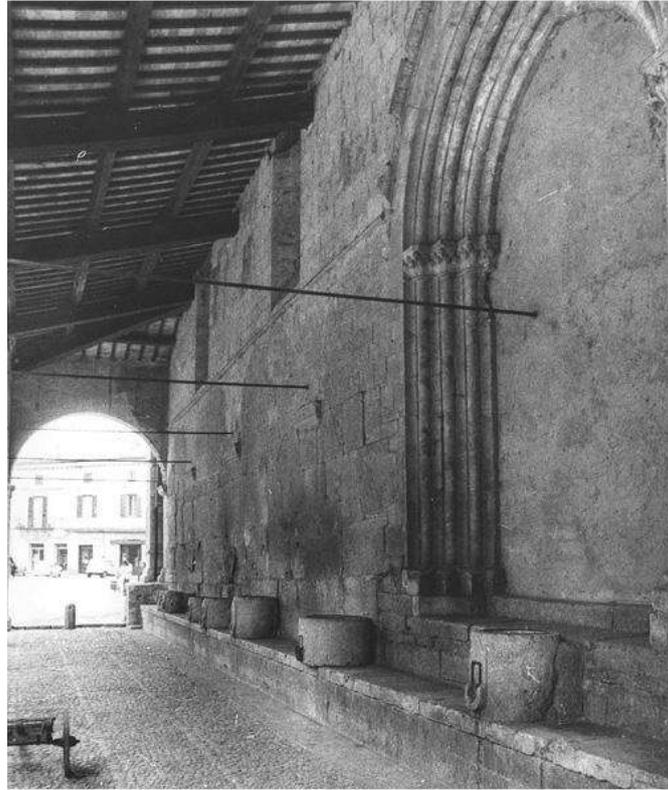


Figura 40 - Portico delle Misure [Archivio SABAP]

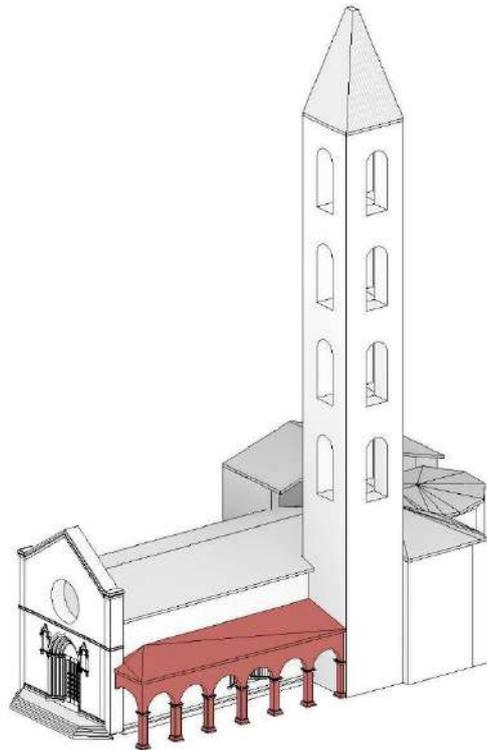


Figura 41 - Modellazione Revit, Basilica di San Benedetto, aggiunta del Portico delle Misure nel 1570

4.3 TERREMOTO 1703 e 1730

Il XVIII secolo è caratterizzato da due gravi eventi sismici, il primo nel 1703 e il secondo nel 1730, che segnano duramente il complesso della Basilica di San Benedetto definendo una serie di modifiche architettoniche di rilievo.

«La scossa del 14 gennaio 1703 delle ore 18 GMT ca. distrusse quasi completamente Norcia: crollarono più di 3.000 abitazioni, 13 chiese e monasteri crollarono del tutto o in parte, gli edifici pubblici furono tutti gravemente danneggiati. Le mura della città crollarono parzialmente; la porta principale e la torre, per metà crollate, divennero pericolanti. [...] Nel secondo rione di San Benedetto crollarono il collegio e, parzialmente, la torre; la chiesa di San Benedetto subì crolli parziali e lesioni, il campanile divenne pericolante» [Guidoboni et al., 2018]

Sembra dunque che il sisma del 1703 non abbia arrecato lesioni importanti all'edificio benedettino. Per la chiesa vennero stimati crolli parziali del tetto, danni al campanile che divenne pericolante, diverse lesioni e fessurazioni nei muri perimetrali e il cedimento della tribuna con conseguente sfondamento di parte della volta della cripta [Gigliozzi, 2019] come emerge dal disegno della piazza della Basilica di Desnoues e Guglielmini del 1706 in Figura 42.

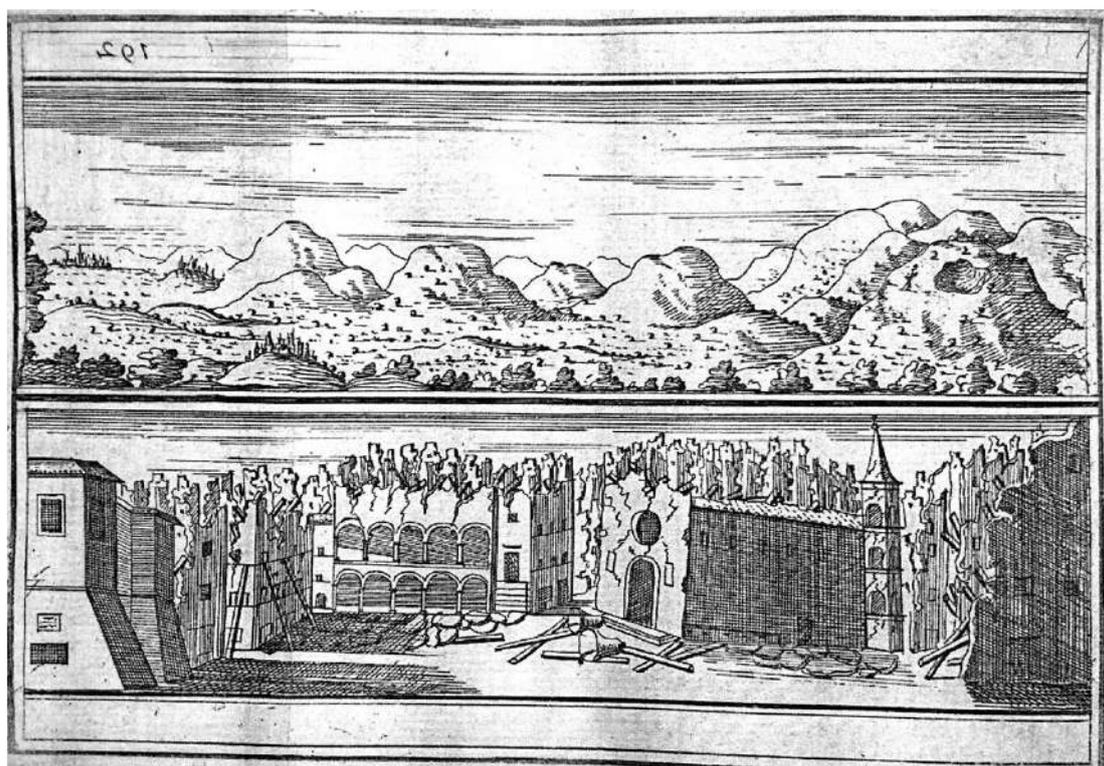


Figura 42 – Piazza di San Benedetto dopo il sisma del 1703 [Desnoues et al., 1706]

Le visite pastorali alla Basilica nel 1709 e nel 1712 non riportano indicazioni in tal senso (il vescovo Lascaris nel 1712 visita tutta la chiesa *ampla et magnifica*, compreso il sacello – *bene compos* - il campanile e il monastero, definito *'abbastanza comodo'*): non si fa alcun riferimento ai danni del recente terremoto, come invece si fa per altri edifici religiosi visitati dal vescovo.

Diverso fu il terremoto del 12 maggio 1730 che causò nella chiesa i danni maggiori:

«Per Norcia si dispone di un quadro piuttosto dettagliato degli effetti, che causarono l'atterramento di quasi tutti gli edifici: 13 complessi ecclesiastici e monasteri subirono crolli e lesioni che li resero inagibili; alcuni palazzi pubblici e il teatro crollarono parzialmente; la maggior parte delle abitazioni divenne inabitabile» [Guidoboni et al., 2018]

A causa di questo evento sismico crollò il campanile, già compromesso dalla sequenza sismica del 1702-1703, che sfondò la copertura della chiesa. Nel 1738, dunque, il campanile fu ricostruito con forme ridotte e il fianco fu rinforzato da una speronatura [Bertolaso et al., 2007].

Nel rifacimento settecentesco del campanile viene ridimensionata l'altezza e ampliato il sedime della struttura verticale dello stesso, per mezzo della realizzazione di una muratura giustapposta tra la cella campanaria ed il transetto che, come si vedrà a seguito della fase diagnostica, non risulta ammorsata (Figura 43). Di particolare interesse è la quota verticale di rifacimento. Infatti, se analizzando le foto pre-sisma 2016 la cella campanaria risulta di un materiale lapideo diverso rispetto alla base, è più probabile che la quota di collasso e conseguente imposta del campanile settecentesco corrispondesse esattamente con quella relativa alla porzione rimasta in opera a seguito del sisma.

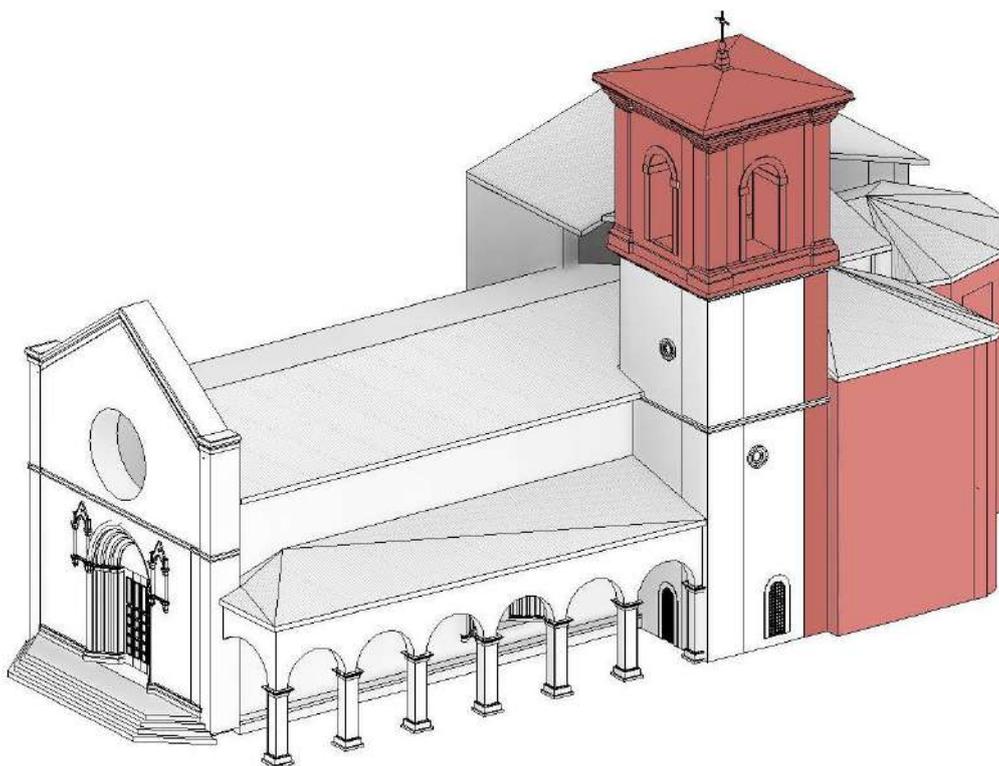


Figura 43 - Modellazione Revit, Basilica di San Benedetto dopo gli interventi settecenteschi

Di seguito (Figura 44) si riporta una pianta della chiesa gotica conservata all'Archivio Segreto Vaticano che riporta la pianta della Basilica prima degli eventi sismici del 1703. Da questa pianta

si può osservare come l'abside presenti un profilo esterno esagonale, da leggersi come possibile rimanenza della fabbrica trecentesca.

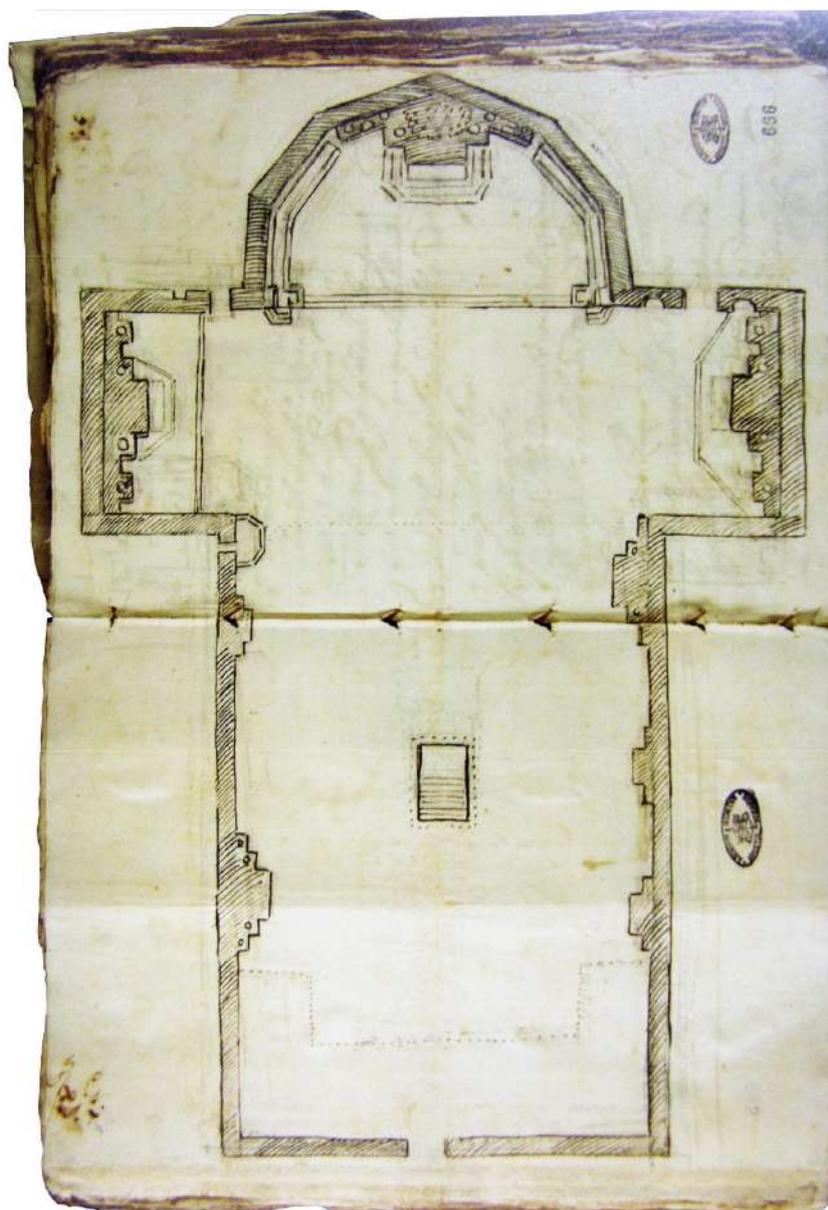


Figura 44 - Planimetria della Chiesa di San Benedetto prima delle rovine del 1703, Archivio Segreto Vaticano [Comino et al., 2013]

In un successivo disegno, datato 1740, l'esterno dell'abside appare modificato in una forma ugualmente poligonale, ma ridotta nel numero di lati. La parte absidale, inoltre, fu «*assai ridotta in altezza rispetto a quella anteriore al 1703*» [Cordella, 1978]. Si tratta dunque di tipici interventi “*antisismici*” che hanno coinvolto gran parte degli edifici più importanti della città di Norcia dopo i terremoti del '700.

La planimetria in Figura 45 riporta il sistema di rinforzo statico al quale si ricorre a seguito del sisma del 1730, il quale consiste nell'addossare alle pareti laterali una serie di pilastri, collegati fra loro con degli arconi, all'interno dei quali furono sistemati gli altari laterali.

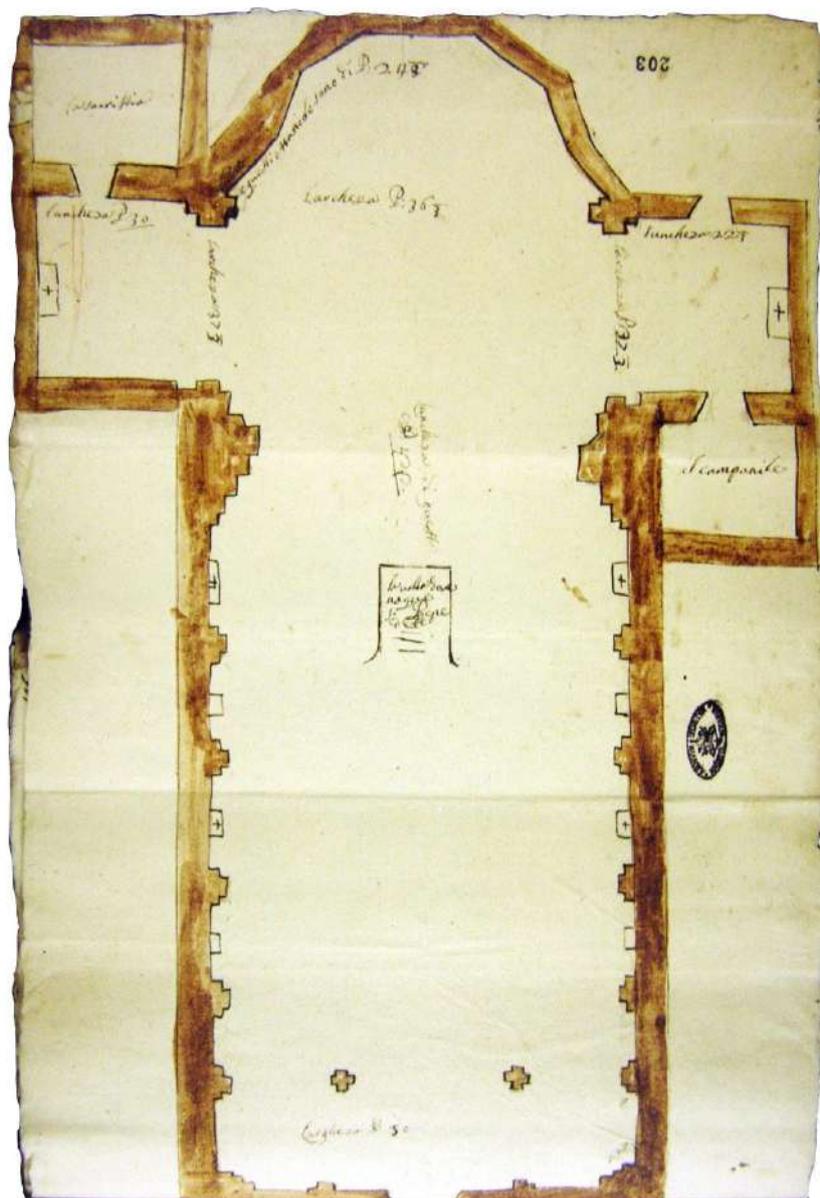


Figura 45 – Progetto per il rinforzo statico della navata della chiesa di San Benedetto, Archivio Segreto Vaticano [Comino et al., 2013]

L'attuale articolazione dello spazio interno è il frutto proprio di quella ristrutturazione settecentesca: un'unica navata a croce latina, con abside poligonale e calotta all'incrocio dei transetti, di forma pressoché immutata sino al 2016 e riprodotta in ambiente BIM come visibile dalla pianta prospettica in Figura 46.

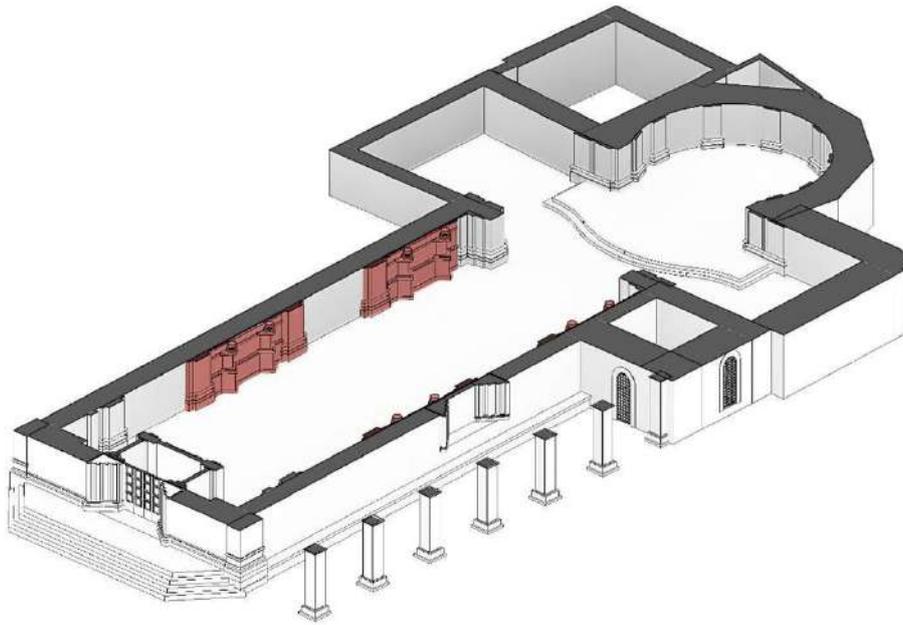


Figura 46 - Modellazione Revit, articolazione spazio interno della Basilica di San Benedetto

Dopo il terremoto del 1730, si decise di rinforzare la struttura con la giustapposizione alle pareti longitudinali di una serie di pilastri e archi ad incorniciare gli altari e le attuali cappelle, mutando leggermente la scansione dello spazio delle cappelle della chiesa gotica. Questa nuova metrica dello spazio della navata, del transetto e dell'abside è ricca di elementi decorativi in stucco e legno. In fase diagnostica, tutte le rifodere inserite nel '700 con lo scopo di creare una nuova scansione dello spazio interno, risultano essere non ammostate e solo giustapposte alle murature della fase gotica.

A copertura della navata è stato realizzato un soffitto ligneo cassettonato decorato con tre grandi tele, successivamente rimosso con i restauri della seconda metà del '900. Questa operazione completa la serie di interventi di quel periodo.

Anche la cantoria ha subito un crollo a seguito dei sismi del '700, portando quindi ad una nuova riedificazione. Durante le fasi di smontaggio della cantoria, fortemente compromessa dal sisma del 2016, si è osservato come anche questa struttura fosse semplicemente appoggiata alla facciata gotica della seconda fase descritta.

4.4 TERREMOTO 22 AGOSTO 1859

Il terremoto avvenuto il 22 agosto 1859 ha danneggiato gravemente la fabbrica in diversi punti.

«La scossa del 22 agosto 1859, avvenuta alle ore 12.32 GMT, ebbe effetti disastrosi a Norcia e nei vicini villaggi [...]. Il patrimonio ecclesiastico fu estesamente danneggiato [...] furono gravemente danneggiate e divennero pericolanti sette chiese, tre conventi e due edifici di proprietà ecclesiastica [...]» [Guidoboni et al., 2018].

La fotografia in Figura 47, ritrae la chiesa dopo gli eventi sismici del 1859. Dalla foto si può osservare, inoltre, come il rosone fosse tamponato e la copertura lignea della navata della chiesa fosse più bassa rispetto al punto più basso della facciata. Si può supporre, dunque, che il rosone fosse tamponato fino a questa fase, anche se non sono note informazioni relative all'apertura del rosone in fasi precedenti.

Si nota, inoltre, che i danni hanno coinvolto per la maggior parte la facciata e il Portico delle Misure: è proprio su questi due elementi che si concentrano gli interventi di questo periodo.

Innanzitutto, si può osservare dalla fotografia storica come le lesioni sul portico risultarono talmente profonde da richiedere un intervento immediato di sostegno del primo arco per evitare che esso crollasse. Dopo questa prima fase di messa in sicurezza, se ne decise la completa demolizione. L'operazione di ricostruzione fu eseguita riutilizzando i materiali recuperati, quali, ad esempio, le basi e i capitelli dei pilastri [Archivio Storico Comunale Norcia].



Figura 47 - La Basilica dopo i danni del sisma del 1859 [Archivio SABAP]

La facciata, invece, è oggetto di un intervento condotto secondo i dettami del restauro stilistico, volto in particolare ad esaltarne la *facies* gotica [DIP, 2020]

Il Consiglio Municipale, dimostrata la situazione di instabilità della facciata (nei documenti [Archivio Centrale dello Stato] si parla di un evidente fuori piombo), approva un progetto di restauro «*su disegno corrispondente allo stile ed al carattere dell'epoca*», prevedendo la demolizione del timpano sino alla cornice dell'oculo (Figura 48).



Figura 48- La demolizione del timpano e del Portico delle Misure a seguito del sisma del 1859 [Archivio SABAP]

Il timpano viene ricostruito più slanciato e ai lati si posizionano due pinnacoli con l'evidente volontà di esaltare l'aspetto gotico della facciata (Figura 49 e Figura 50).

L'intervento, realizzato tra il 1859 e il 1878 (anno in cui tuttavia non è ancora terminata la parte sommitale con i pinnacoli) ha comportato la riapertura dell'oculo e la chiusura delle due finestrelle quattrocentesche posizionate ai lati. Per consentire la posa in opera della struttura vetrata dell'oculo si dovette rialzare una piccola parte della copertura [Archivio Centrale dello Stato]. Inoltre, in questo periodo, fu aperto il rosone: questo ha comportato la realizzazione, a ridosso della facciata, di una porzione di copertura più elevata. Il rosone fu eseguito in questa fase da *Adolfo Cipollini di Carrara* mentre la vetrata è stata recentemente sostituita, prima comunque dei lavori giubilari, ed è opera di Mellini – Firenze (eseguita nel 1991). In quest'epoca si è anche realizzata la cornice superiore della facciata e realizzate le guglie.

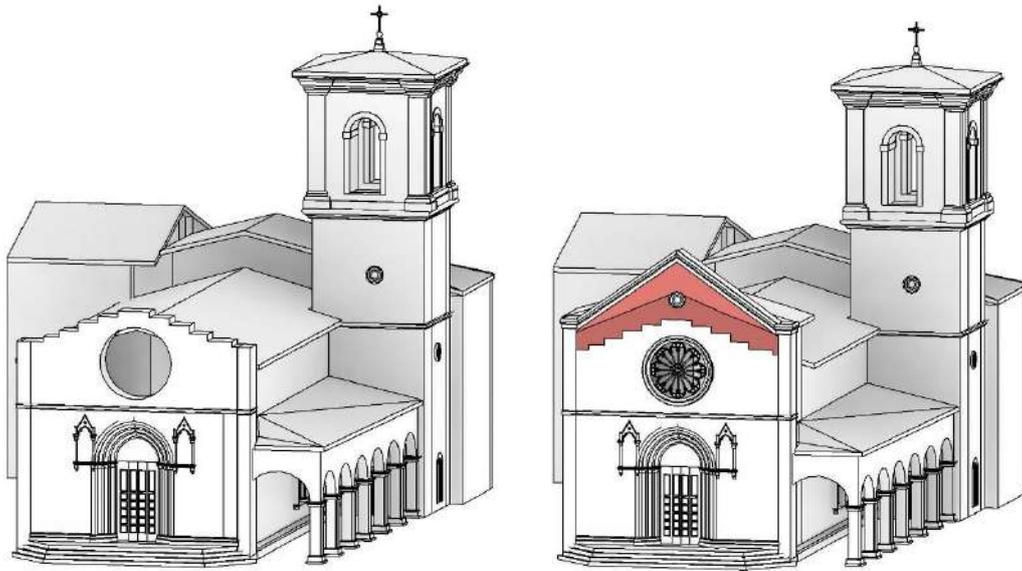


Figura 49 - Modellazione Revit, Basilica San Benedetto a seguito dei lavori in facciata



Figura 50 - La facciata a seguito dell'intervento di restauro eseguito fra il 1856 e il 1878 [Archivio SABAP]

Inoltre, come si può osservare sempre in Figura 50, era ancora presente una finestra a ridosso della facciata, probabilmente in corrispondenza della cantoria. Anche a seguito del collasso del 2016 è possibile notare la presenza dell'imbotte della finestra originariamente presente a ridosso della facciata (Figura 51), e quindi probabilmente risalente alla fase settecentesca.



Figura 51 - Imbotte della finestra gotica tamponata posta a ridosso della facciata

4.5 INTERVENTI DI RESTAURO DAL 1958

Negli anni Cinquanta del XX secolo, in particolare dal 1958, l'interno della Basilica è stato interessato da numerosi interventi di restauro in particolare per quanto riguarda le strutture orizzontali. Dopo il restauro della facciata a seguito del terremoto ottocentesco, si era sopraelevata solo la prima parte del muro della navata laterale, che viene in questa fase portato tutto alla medesima altezza. Questo comporta la rimozione del soffitto ligneo cassettonato del '700 e la ricostruzione del tetto ad una quota più alta, che fu pensato a capriate su mensole d'appoggio (Figura 52 e Figura 53).

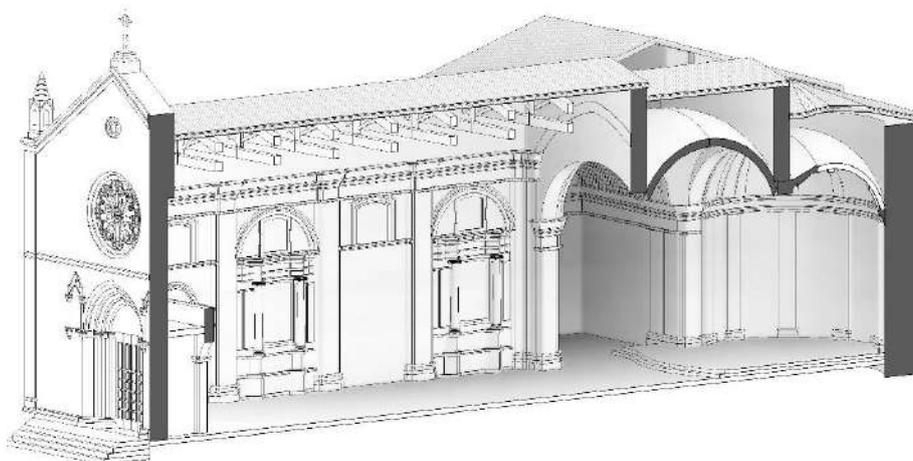


Figura 52 - Modellazione Revit, spaccato della Basilica di San Benedetto



Figura 53 - Post restauri 1950, soffitto a capriate su mensole d'appoggio [Archivio SABAP]

Oltre alla regolarizzazione della quota, il muro laterale ha subito alcune modifiche come la riapertura delle preesistenti aperture gotiche che sono state svuotate e tamponate e quindi riportate a vista. Anche la finestra presente a ridosso della facciata è stata tamponata, come visibile in Figura 54, e non era più visibile in seguito a quei lavori se non per la ghiera dell'arco ancora riconoscibile prima del sisma del 2016.



Figura 54 - Basilica a seguito degli interventi di restauro del 1950 [Archivio SABAP]

Durante questi restauri, con la rimozione del soffitto ligneo cassettonato, che in un primo momento si pensa di ripristinare a fine lavori, venne alla luce un arco ad ogiva poco sopra l'arcone trasversale che suddivide la navata centrale dal transetto (Figura 55). La scoperta di quest'arco ad ogiva, in linea con la *facies gotica* della fabbrica che si voleva restaurare, esclude la ricollocazione del soffitto ligneo a cassettoni in favore del mantenimento a vista delle capriate [DIP, 2020].



Figura 55 - Arcone a ogiva riscoperto a seguito dei restauri del 1950 [Archivio SABAP]

Ai restauri degli anni Cinquanta del '900 si possono ascrivere anche le modifiche alle strutture voltate del transetto e del presbiterio che si sono rivelate in latero-cemento, a seguito dell'analisi dei materiali di crollo. È plausibile supporre che in occasione di questi lavori si decise anche di rimuovere le catene che erano state poste in corrispondenza dei pilastri di rinforzo, di fatto poi non più visibili internamente.

Si può, infine, citare tra gli interventi di restauro di questo periodo la rimozione delle volte all'interno del Portico delle Misure (Figura 56), sostituite da una copertura lignea (Figura 57).



Figura 56 - Portico delle Misure in una cartolina del 1942, prima della demolizione delle volte avvenuta durante i restauri del 1958 [ICCD]



Figura 57 - Portico delle Misure, pre sisma 2016 [Archivio SABAP]

Come accennato nel precedente paragrafo, nel 1991, la vetrata del rosone è stata sostituita per opera di Mellini – Firenze, come visibile da Figura 58. La vetrata è stata oggetto di smontaggio a seguito degli eventi sismici che hanno colpito la Basilica nel 2016.



Figura 58 - Vetrata Rosone, opera di Mellini [Archivio SABAP]

4.6 INTERVENTI DEL 2000, ANNO DEL GUBILEO

La configurazione della Basilica di San Benedetto prima del sisma del 2016 (riprodotta in ambiente *Revit* in Figura 59 e visibile fotograficamente in Figura 60) è ascrivibile agli ultimi interventi del 2000, in occasione del Giubileo che hanno riguardato sia la riparazione dei danni prodotti dal sisma del 1997 sul campanile e sulle coperture del convento che opere di restauro e rifunzionalizzazione degli spazi interni della chiesa con lo spostamento dell'ingresso della cripta, la sistemazione dell'altare e il rifacimento dei pavimenti della Basilica stessa.

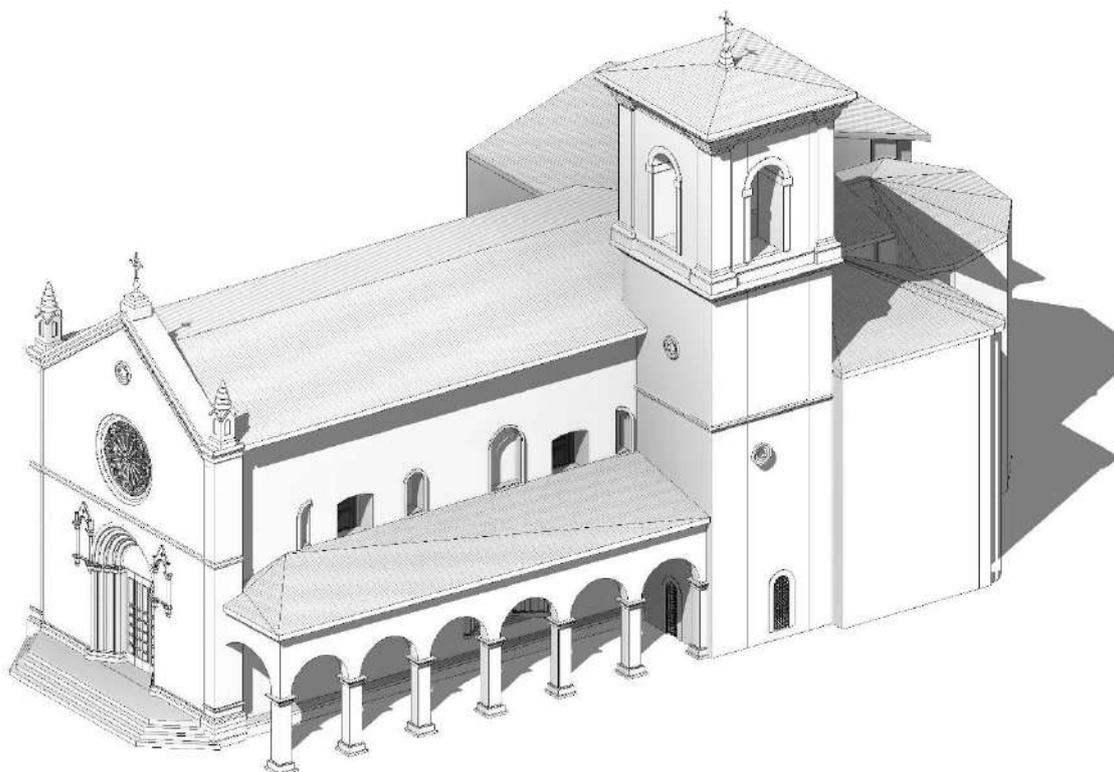


Figura 59 - Modellazione Revit, Basilica di San Benedetto nella situazione pre-sisma 2016



Figura 60 – Basilica di San Benedetto a Norcia in stato pre-sisma [Archivio SABAP]

4.7 CRIPTA

Le vicissitudini storiche della cripta della Basilica di San Benedetto sono molto ricche di avvenimenti e modifiche, in linea con quanto accaduto alla chiesa superiore.

Dalle foto risalenti alla situazione pre-sisma 2016 (Figura 61) si può osservare che l'ambiente della cripta è diviso in tre navate di cui la mediana, più ampia, è coperta da una volta a sesto ribassato che sembra abbracciare lo spazio di una quarta navata distrutta. Sappiamo infatti che a seguito del collasso del campanile settecentesco il pavimento fu profondamente colpito con conseguente sfondamento della cripta. A metà dell'aula due piloni di rinforzo che sostengono l'arco trionfale superiore della chiesa settecentesca interrompono le navate laterali, coperte da volte a crociera non più tutte originali. L'ambiente comunica ad ovest con il vano del campanile. I pilastri e i capitelli delle navate sono rozzamente scolpiti, il pavimento è compartito da fasce in pietra rossa e da sette formelle geometriche del sec. XIV, scompagnate in più punti. I pilastri quadrati con i rozzi capitelli fanno parte della ristrutturazione trecentesca ma risalgono forse ad un'età più antica.

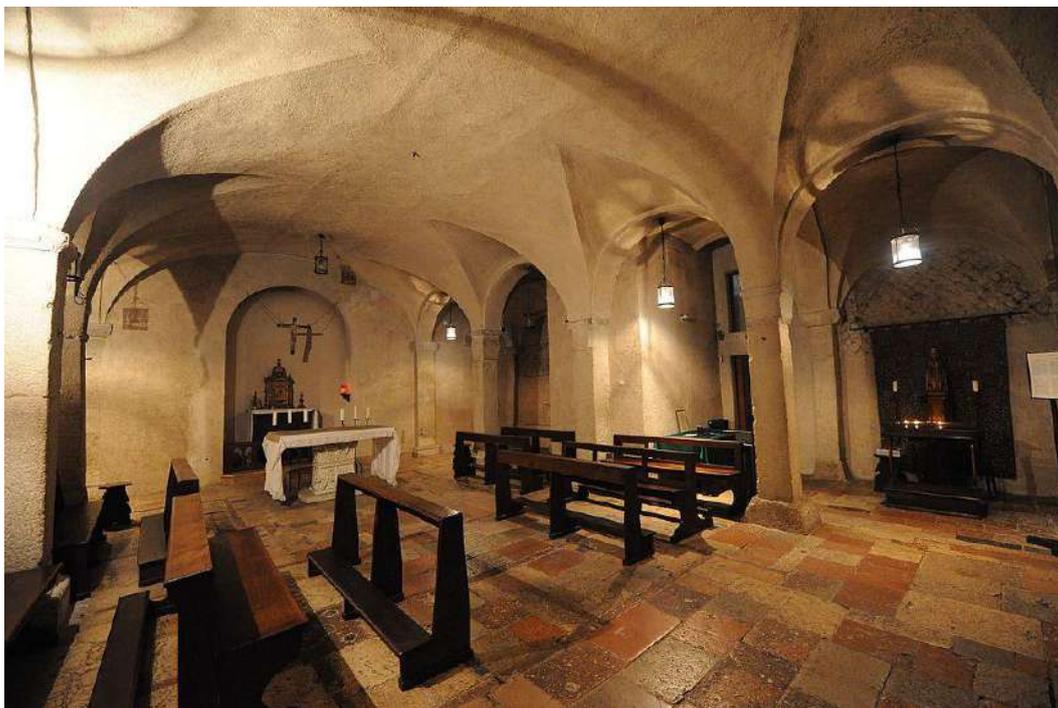


Figura 61 - Cripta della Basilica di San Benedetto, foto pre-sisma 2016 [Archivio SABAP]

L'accesso alla cripta è stato più volte modificato. In passato pare esistesse solo una scala sulla destra. Quest'ultima fu risistemata nel 1654 e sostituita con uno scalone che scendeva centralmente in basso. Nel 1880 si realizzarono due nuove scale laterali in sostituzione dell'accesso seicentesco ma nel 1910, per volere del vescovo di Norcia Ercolano Marini, le si demolì entrambe per fare posto ad una grande scalinata centrale il cui imbocco, contornato da una transenna in bronzo, venne ad occupare quasi tutta la navata, come si può osservare dall'immagine in Figura 62 [Cordella, 2002]. Dopo gli interventi del 1958, si ripristinarono gli accessi laterali. Infine, con gli interventi del 2000 si portò l'accesso alla cripta solo dal lato sinistro.

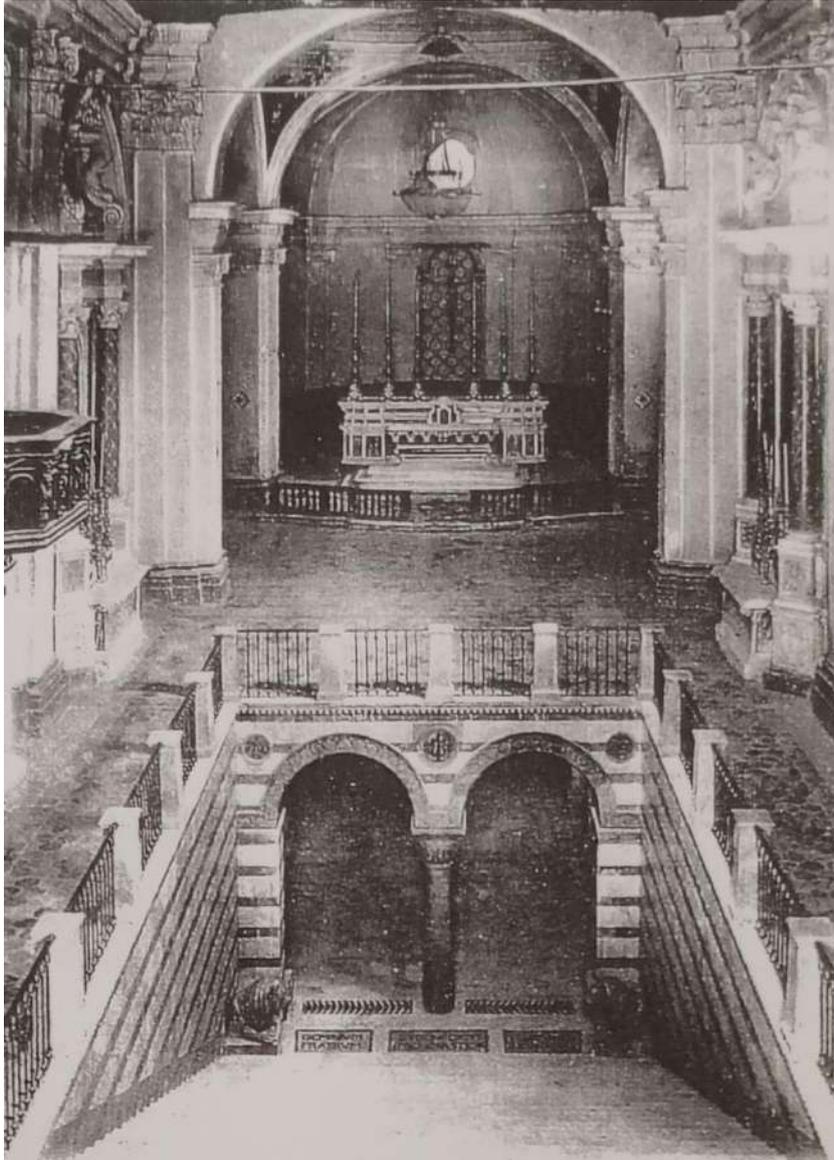


Figura 62 – Scalinata centrale di accesso alla cripta dopo gli interventi del 1910 [Archivio SABAP]

Queste tormentate vicende consentirono di scoprire, nel 1912-13, sotto il pavimento della chiesa, un muro romano semicircolare con raggio di 3,5 m, costruito in opera a sacco, in cui si vedono ancora impressi i segni del cassone. Le pareti della cripta rivelarono strutture in opera reticolata dallo spiccato in su. Questo ambiente absidato di pianta quadrata, parte di un più vasto edificio pubblico romano della fine del I sec. d.C., fu trasformato nel primitivo oratorio di S. Benedetto con orientamento opposto a quello della chiesa attuale [Cordella, 2002].

5. INDAGINI IN SITU

A novembre 2020 è stata eseguita una campagna di indagini *in situ*. Il piano di indagine redatto aveva come scopo quello di verificare le ipotesi del susseguirsi delle varie fasi costruttive, a completamento della ricerca bibliografica e documentaria ampiamente descritta al Capitolo 4, e la descrizione della composizione dei materiali costituenti la Basilica affiancata all'analisi di alcuni significativi dettagli costruttivi.

Le indagini eseguite hanno riguardato la caratterizzazione dei materiali leganti, le esecuzioni di prove soniche, georadar nei prospetti e nel pavimento e l'esecuzione di alcuni carotaggi abbinati a video-endoscopia. Sono state svolte le seguenti indagini, visibili schematicamente in Figura 63:

- n.43 prelievi di materiale legante
- n.1 prova sonica diretta
- n.1 prova sonica tomografica
- n.4 carotaggi Φ 36 mm con video-endoscopia
- n. 5 zone di indagine georadar

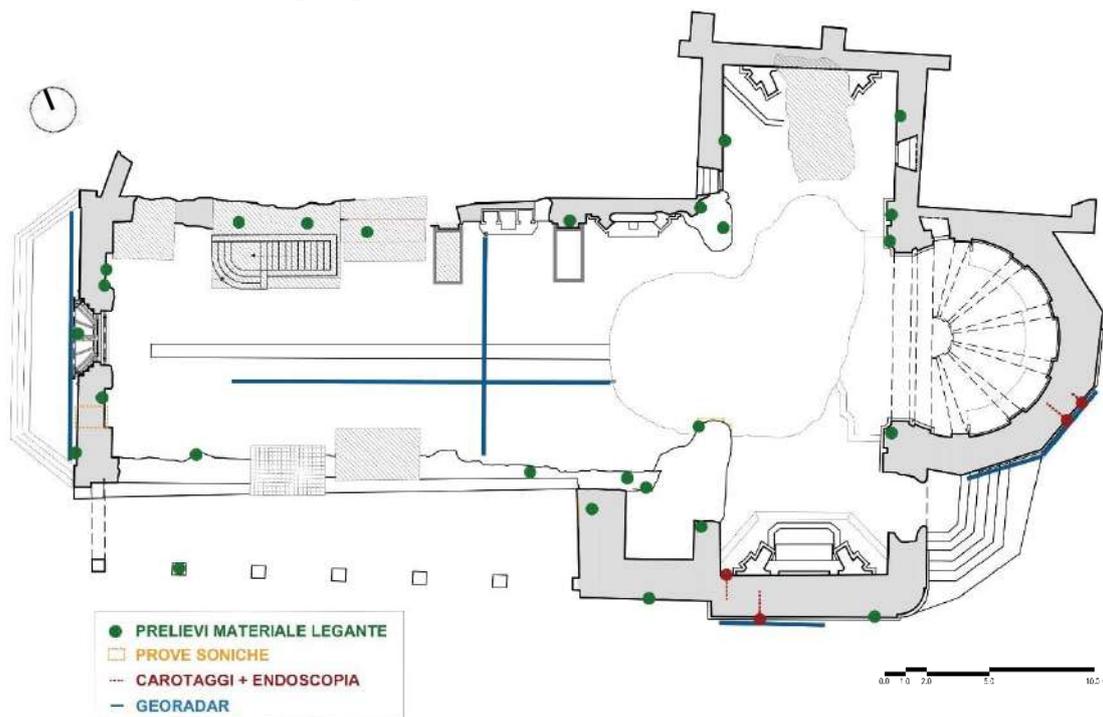


Figura 63 – Localizzazione in pianta delle indagini eseguite nella Basilica di San Benedetto

Le parti di Basilica indagate possono riassumersi in quattro macroaree: facciata, transetto, abside e pavimentazione della navata.

In facciata sono state eseguite indagini georadar estese soprattutto nella parte alta della facciata e dei test sonici, con lo scopo di valutare nel complesso la presenza di danneggiamenti e la consistenza attuale della facciata e di riconoscere le due fasi di costruzione della facciata nonché i due strati da cui essa è costituita.

Nell'abside e nel transetto sono state eseguite, invece, indagini georadar estese e in queste due zone si sono eseguiti i 4 carotaggi. In queste zone le indagini miravano, oltre al riconoscimento delle caratteristiche dell'apparecchiatura muraria, all'individuazione delle diverse fasi costruttive e quindi la valutazione della possibile presenza di paramenti separati desumibile dall'evoluzione storica della fabbrica.

Per ultimo, le indagini georadar sul pavimento della navata hanno avuto l'obiettivo di valutare la presenza di eventuali vuoti generati dalle varie modifiche di accesso alla cripta dalla chiesa che si sono succedute durante i secoli.

La localizzazione di tutte le prove eseguite durante la campagna di indagine è stata riportata nelle tavole in Appendice D.

- T01 – LOCALIZZAZIONE PROVE – PIANTE
- T02 – LOCALIZZAZIONE PROVE – FACCIATA
- T03 – LOCALIZZAZIONE PROVE – PROSPETTO SUD E SEZIONE LONGITUDINALE
- T04 – LOCALIZZAZIONE PROVE – ABSIDE ESTERNO
- T05 – LOCALIZZAZIONE PROVE – ABSIDE INTERNO
- T06 – SONICHE – SONICA DIRETTA
- T07 – SONICHE – SONICA TOMOGRAFICA
- T08 – CAROTAGGI ED ENDOSCOPIE – TRANSETTO ESTERNO
- T09 – CAROTAGGI ED ENDOSCOPIE – TRANSETTO INTERNO
- T10 – CAROTAGGI ED ENDOSCOPIE – ABSIDE
- T11 – GEORADAR – FACCIATA VISTA COMPLESSIVA
- T12 – GEORADAR – FACCIATA-TIMPANO
- T13 – GEORADAR – FACCIATA-ROSONE
- T14 – GEORADAR – TRANSETTO
- T15 – GEORADAR – ABSIDE VISTA COMPLESSIVA
- T16 – GEORADAR – ABSIDE INTERNO ED ESTERNO
- T17 – GEORADAR – PAVIMENTO
- T18 – GEORADAR – RADARGRAMMI FACCIATA
- T19 – GEORADAR – RADARGRAMMI TRANSETTO ABSIDE PAVIMENTO

5.1 STUDIO DELLE CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE TRAMITE ANALISI DEI MATERIALI LEGANTI

Tra le varie prove che sono state effettuate sulla Basilica di San Benedetto, è stato previsto nel piano di indagine il prelievo di materiale legante. Questa tipologia di prova, infatti, si rivela un metodo adatto per l'individuazione delle fasi costruttive di edifici complessi [Secco et al., 2018; Secco et al., 2019]. Si addice quindi al caso studio della Basilica di San benedetto, oggetto di diverse modifiche costruttive nel corso dei secoli, come emerge dal precedente capitolo. Nella campagna di indagine svoltasi a novembre 2020 sono stati prelevati solo 17 campioni dei 43 prelievi totali effettuati. La restante parte di prelievi di materiale legante, in un numero di 26 campioni, sono stati eseguiti in una precedente campagna di indagini, svoltasi a settembre 2019, con conseguente preparazione dei campioni in laboratorio. Entrambe le campagne di indagini sono state strutturate in una serie di indagini mineralogiche, petrografiche, microchimiche e microstrutturali con lo scopo di definire le caratteristiche composizionali, tessiturali e microstrutturali dei leganti.

I materiali leganti oggetto di studio sono stati prelevati *in situ* in modo da poter permettere la massima rappresentatività del campione, contenendo il numero di prelievi e la loro invasività. I prelievi sono stati effettuati dal Dott. Michele Secco, mediante rimozione manuale con ausili meccanici, quali martello e scalpello (Figura 64). Sono stati realizzati in porzioni sub-superficiali o interne, al fine di escludere materiali che possono avere subito alterazioni dovuti all'esposizione con agenti atmosferici.



Figura 64 – Esecuzione di un prelievo di materiale legante nella Basilica di San Benedetto

Di seguito si riportano in sintesi i posizionamenti dei vari campioni. Da Figura 65 a Figura 72 si mostra il posizionamento dei primi 26 campioni prelevati nella prima fase di indagine svoltasi a settembre 2019. Da Figura 73 a Figura 78 si mostra, invece, il posizionamento dei restanti 17 campioni prelevati nella seconda fase di indagine a novembre 2020. Il posizionamento di tutti i campioni prelevati in pianta, sezione e prospetto è visibile nelle tavole in Appendice D (da T01 a T05).



Figura 65 - Campionamenti eseguiti in controfacciata: SB_20 (sinistra), SB_21 (centro), SB_22 (destra)



Figura 66 – Campionamenti eseguiti in corrispondenza dell'affresco: SB_16, SB_15 e SB_14 (da sinistra a destra)



Figura 67 – Campionamenti eseguiti sul muro della navata sinistra: SB_23, SB_24, SB_01, SB_02 e SB_03 (da sinistra a destra)



Figura 68 - Campionamenti eseguiti sul muro della navata destra: SB_01 (sinistra), SB_11 (destra)



Figura 69 - Campionamenti eseguiti sul transetto sinistro (SB_04, SB_05, SB_07) e nell'abside (SB_06)



Figura 70 - Campionamenti eseguiti sul transetto destro (SB_13, sinistra), e sul muro di contatto con il campanile (SB_12, destra)



Figura 71 - Campionamenti eseguiti nel campanile: SB_19 (sinistra), SB_08 (centro), SB_09 (destra)



Figura 72 – Campionamenti eseguiti su cella campanaria crollata: SB_17 (sinistra) e SB_18(destra)



Figura 73 - Campionamenti eseguiti in facciata: SB_27 (sinistra), SB_28 (centro), SB_29 (destra)



Figura 74 - Campionamenti eseguiti nel muro della navata destra (SB_31, sinistra) e nella base di una colonna del Portico delle Misure (SB_39, destra)



Figura 75 - Campionamenti eseguiti nel campanile SB_32 (sinistra), SB_33 (centro) e nella nicchia esterna del transetto SB_30 (destra)



Figura 76 - Campionamenti eseguiti alla base del campanile: SB_35 (sinistra), SB_36 (centro), SB_37 (destra)



Figura 77 - Campionamenti eseguiti nell'arco trionfale dell'abside (SB_38, sinistra) e alla base dell'arco trionfale presente tra navata e transetto (SB_34, destra)



Figura 78 - Campionamenti eseguiti negli scavi archeologici e nella cripta (SB_40, SB_41, SB_42 da sinistra a destra)

I campioni così prelevati sono stati portati in laboratorio al fine di potere essere analizzati e studiati. Il processo di preparazione dei campioni, che viene illustrato nei paragrafi seguenti, riguarda i 17 campioni prelevati nell'ultima campagna di indagine di novembre 2020, in quanto la preparazione dei precedenti campioni era già stata svolta immediatamente in seguito al loro prelievo. I risultati che verranno analizzati saranno, invece, comprensivi di tutti i campioni in quanto, come vedremo, essi possono essere raggruppati per le loro caratteristiche e l'appartenenza a diverse fasi storico-costruttive.

Le analisi che vanno eseguite sui campioni prelevati *in situ* sono:

- Analisi mineralogiche in diffrattometria ai raggi X delle polveri (XRPD);
- Analisi petrografiche sia su campioni microscopici che su preparati in sezione sottile trasversale mediante microcopia ottica (OM-TL);
- Analisi microstrutturali e microchimiche in microscopia elettronica a scansione con associata microanalisi chimica in fluorescenza X a dispersione di energia (SEM-EDS).

Di seguito, quindi, verranno analizzati i risultati di ognuna, previa una breve spiegazione della fase di preparazione dei campioni per le analisi, diversa a seconda dell'analisi da eseguire.

5.1.1 Analisi mineralogica in diffrattometria ai raggi X (XRPD)

5.1.1.1 Preparazione dei campioni

Previa essiccazione a massa costante, sono state scelte porzioni di materiale legante per essere sottoposte ad analisi mineralogica in diffrazione ai raggi X delle polveri (XRPD).

La preparazione dei campioni è stata supervisionata dal Dott. Michele Secco, eseguita nei laboratori del dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, ed ha seguito diversi passaggi.

Innanzitutto, si è portato il campione ad avere una granulometria inferiore al mezzo millimetro (Figura 79), attraverso il processo di macinazione. Si è dunque selezionata una porzione di campione che risultasse rappresentativa.



Figura 79 Campioni di malte a seguito del processo di macinazione

Successivamente, il materiale deve essere portato ad una granulometria inferiore ai 5 μ m, diminuendo quindi di due volte l'ordine di grandezza e ottenendo una consistenza pari al talco. Per far ciò si è eseguito un processo detto di micronizzazione.

In questa fase vengono utilizzati circa 10 g della polvere ottenuta attraverso la macinazione. Il quantitativo necessario destinato al processo di micronizzazione viene preso mediante processo di quartatura, che consiste nel dividere la quantità totale di polvere in quarti e prenderne una

parte, in modo tale da considerare per le analisi sempre un materiale omogeneo nelle sue caratteristiche.

Tale porzione di campione viene dapprima passata su un setaccio di 0,5 mm in modo da avere una prima setacciatura del materiale così come proviene dalla macinazione. Successivamente, mediante l'utilizzo di pestello e mortaio, si procede a mano con un'ulteriore riduzione della granulometria della restante parte di campione, fino a quando tutta la polvere risulta passare al setaccio (Figura 80).



Figura 80 - Quartatura, setacciatura e utilizzo di mortaio e pestello

A questo punto, si può procedere con la fase di micronizzazione distinta in lavaggio, avvinamento e micronizzazione vera e propria. Per questa fase si utilizza il mulino micronizzatore, visibile in Figura 81.



Figura 81 - Mulino micronizzatore e giara con dadi di zirconia

Il mulino micronizzatore fa vibrare la giara contenente i dadi di zirconia in cui viene aggiunto il campione. Grazie alle vibrazioni, le particelle si scontrano l'una con l'altra e vanno incontro a rottura, diminuendo così la loro granulometria e raggiungendo dimensioni sotto i 10 μm .

Per ogni campione preso in considerazione si procede innanzitutto con il lavaggio. È necessario, infatti, rimuovere i residui di polveri dei campioni analizzati precedentemente dall'interno della giara. Questo avviene introducendo nella giara 10 ml di acqua deionizzata e facendo girare per 2 minuti la giara nel micronizzatore. Successivamente, si prosegue con la fase detta di *avvinamento* che consiste nel far girare per altri 2 minuti la giara e i dadi di zirconia nel micronizzatore,

contenente questa volta però non solo 10 ml di acqua ma anche pochi grammi del campione da analizzare. Anche questa è una fase di pulitura della giara, utilizzando il campione che verrà ora micronizzato con la fase di micronizzazione vera e propria. Dopo l'avvinamento si deve aver cura di asciugare bene la giara e i dadi di zirconia e si procede con l'inserimento di tre palette di campione unite a 15 ml di etanolo. Non si esegue una micronizzazione ad acqua ma ad etanolo perché l'acqua potrebbe reagire con la malta, compromettendo l'analisi. Si lascia dunque la giara nel micronizzatore per circa 5 minuti.

Al termine della fase di micronizzazione si ottiene un liquido costituito da etanolo e campione micronizzato (Figura 82), che viene posto in un vetrino da orologio.

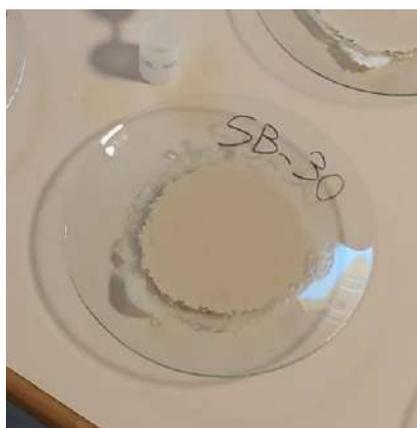


Figura 82 - Campione dopo la fase di micronizzazione

Dopo circa 24 ore l'etanolo evapora e si può dunque procedere con la rimozione della polvere ottenuta dal vetrino, mediante l'utilizzo di una lametta (Figura 83).



Figura 83 - Rimozione campione dal vetrino

La polvere così ottenuta viene successivamente miscelata con uno standard noto. Questa procedura è molto importante perché permette di individuare e quantificare la fase amorfa presente nel campione, che altrimenti non sarebbe visibile ai raggi X. In questo caso viene aggiunto come standard ossido di zinco pari al 20% del quantitativo del campione. Nel caso in cui i risultati mostrino una fase amorfa maggiore del 20% significa che nel campione è presente un quantitativo di amorfo che sarà opportunamente scalato.

Nel caso specifico, si prosegue misurando con una bilancia ad altissima precisione (Figura 84) 0,8000 grammi di campione a cui si aggiungono 0,2000 grammi di ossido di zinco, con un errore ammissibile di $\pm 0,0005$ g.



Figura 84 - Miscelazione con ossido di zinco

Si procede con la miscelazione delle due polveri con mortaio e pestello. Successivamente, la polvere ottenuta viene posta nei porta-campioni, come mostrato in Figura 85, che poi saranno inseriti del diffrattometro per procedere con l'analisi in diffrazione ai raggi X.



Figura 85 - Preparazione polveri nei portacampioni

5.1.1.2 Risultati analisi mineralogiche in diffrazione ai raggi X delle polveri (XRPD)

In Tabella 6 si riporta l'analisi dei profili mineralogici ottenuti mediante analisi quantitativa XRPD sui campioni di materiale legante prelevati.

Tabella 6 - Profili mineralogici quantitativi ottenuti mediante analisi quantitativa XRPD

Campione	Calcite [%]	Vaterite [%]	Fase AFm [%]	Quarzo [%]	Albite [%]	Smectite [%]	Gesso [%]	Fase amorfa [%]
SB_01	80.2	0.0	0.0	14.8	0.0	0.7	0.0	2.8
SB_02	80.9	0.0	0.0	12.6	0.0	0.7	0.0	4.5
SB_03	84.1	0.0	0.0	11.3	0.0	0.2	0.0	3.3
SB_04	80.1	0.0	0.0	16.1	0.0	1.8	0.0	1.4
SB_05	78.9	0.0	0.0	12.2	0.1	0.1	0.0	7.1
SB_06	81.1	0.0	0.0	12.4	0.0	0.8	0.0	4.6
SB_07	81.6	0.0	0.0	14.2	0.0	0.7	0.0	1.9
SB_08	83.8	1.2	0.0	5.4	0.0	0.6	0.0	8.1
SB_09	77.4	1.6	0.7	4.7	0.0	0.0	0.2	15.3
SB_10	81.6	0.0	0.0	12.5	0.0	0.1	0.0	4.6
SB_11	81.3	0.0	0.0	13.4	0.0	0.6	0.0	3.3
SB_12	79.4	0.0	0.0	11.1	0.0	0.5	0.0	8.1
SB_13	78.5	0.0	0.0	15.2	0.0	1.2	0.0	3.6
SB_14	91.2	0.0	0.0	3.3	0.1	0.3	0.0	4.8
SB_15	78.5	0.0	0.0	14.5	0.0	1.1	0.0	4.4
SB_16	69.8	0.0	0.0	15.5	0.0	0.7	5.4	6.7
SB_17	80.7	0.6	0.0	6.8	0.0	0.0	0.0	9.7
SB_18	81.9	0.0	0.0	5.7	0.6	0.0	0.0	10.8
SB_19	81.8	0.0	0.0	9.2	0.0	0.5	0.0	7.8
SB_20	79.4	0.0	0.0	13.8	0.0	0.3	0.0	5.3
SB_21	74.8	0.0	0.0	15.8	0.0	0.7	0.0	7.0
SB_22	77.4	0.0	0.0	12.5	0.0	1.1	0.0	7.5
SB_23	83.7	0.0	0.0	8.5	0.0	0.0	0.0	6.8
SB_24	81.1	0.0	0.0	11.2	0.0	0.2	0.0	6.1
SB_25	84.0	0.0	0.0	12.1	0.0	0.7	0.0	2.0
SB_26	80.9	0.0	0.0	4.7	0.0	0.0	0.0	13.6
SB_27	83.1	0.0	0.0	11.5	0.0	0.3	0.0	3.9
SB_28	85.7	0.0	0.0	9.7	0.0	0.2	0.0	3.0
SB_29	85.0	0.0	0.0	7.8	0.0	0.0	0.0	6.0
SB_29i	78.7	0.0	0.0	13.3	0.0	1.1	0.0	5.4
SB_30	78.9	0.0	0.0	14.3	0.0	1.0	0.0	4.4
SB_31	80.8	0.0	0.0	14.8	0.0	0.8	0.0	1.8
SB_32	74.8	0.6	0.3	5.2	0.0	0.4	0.0	15.9
SB_33	83.3	0.0	0.0	6.6	0.0	0.0	0.0	9.0
SB_34	82.6	0.0	0.0	10.3	0.0	0.5	0.0	5.1
SB_35	77.7	0.0	0.0	5.6	0.0	0.1	0.0	15.8
SB_36	70.4	0.0	0.0	7.7	0.0	1.7	0.0	19.5

SB_37	82.9	0.0	0.0	5.7	0.0	0.0	0.0	10.5
SB_38	77.2	0.0	0.0	16.6	0.1	1.0	0.0	4.6
SB_39	83.4	0.0	0.0	12.6	0.0	0.2	0.0	2.4
SB_40	95.3	0.0	0.0	3.1	0.0	0.2	0.0	0.3
SB_41	96.1	0.0	0.0	2.1	0.0	0.6	0.4	0.0
SB_42	88.4	0.0	0.0	8.0	0.1	0.7	0.0	2.1

Dall'analisi dei profili mineralogici quantitativi ottenuti mediante analisi XRPD sui campioni di materiali analizzati emerge che tutti i campioni sono composti da aliquote nettamente dominanti di calcite, da un minimo di 70.4 wt% del campione SB_36 ad un massimo di 96.1 wt% del campione SB_41. Risultano inoltre sempre presenti aliquote significative di quarzo.

La calcite è da ascrivere sia alla calcite antropogenica prodottasi come conseguenza della carbonatazione della componente calcica del legante durante le fasi di presa ed indurimento delle malte, sia alla frazione di aggregato calcareo. Il quarzo, invece, è ascrivibile ad una componente silicatica accessoria della frazione di aggregato delle malte. A questa componente possono essere associate tracce di albite e smectite. Mentre l'albite è presente solo sporadicamente in alcuni campioni, la smectite è rilevata in un numero maggiore di campioni e permette di ipotizzare la presenza di frazioni di aggregato di tipo marnoso e frazioni residue a granulometria siltoso-argillosa. Tale ipotesi è ulteriormente corroborata dall'occorrenza di fase amorfa in tutti i campioni, in aliquote variabili ma sempre chiaramente rilevabili, infatti, la presenza di composti amorfi è egualmente da ricondursi a fasi paracrystalline di natura argillosa presenti nelle marne e nei sedimenti fini.

Quattro campioni presentano vaterite, che indicano la presenza di reazioni idrauliche o pozzolaniche delle matrici leganti. Questa ipotesi è rafforzata dalla presenza di fasi AFm, ovvero sia alluminati idrati di calcio che sono il prodotto cristallino dei processi di reazione idraulica nelle malte. In aggiunta, tre campioni presentano aliquote rilevabili di gesso.

In Figura 86 è possibile osservare il *biplot* relativo all'analisi statistica delle componenti principali dei dati mineralogici ottenuti. L'analisi statistica effettuata sul *dataset* completo risulta poco discriminante, in quanto la maggioranza dei campioni risultano raggruppati in un cluster omogeneo compreso in valori di PC1 tra -1 e 1.5 e di PC2 tra -2 e 1.

Risultano tuttavia presenti quattro *outlier*: il campione SB_16 che presenta valori di PC2 prossimi al 3 e si differenzia nettamente per le marcate concentrazioni di gesso, a suggerire ulteriormente la natura composita del legante impiegato. I campioni SB_9, SB_32 ed SB_36, tutti pertinenti al basamento ed alla parte inferiore del campanile, presentano valori di PC1 positivi e di PC2 prossimi a 2, correlandosi inoltre significativamente con la fase amorfa, le fasi AFm e i polimorfi metastabili del carbonato di calcio: tali evidenze sperimentali permettono di suggerirne marcate caratteristiche idrauliche (presenza di composti paracrystallini di tipo C-S-H).

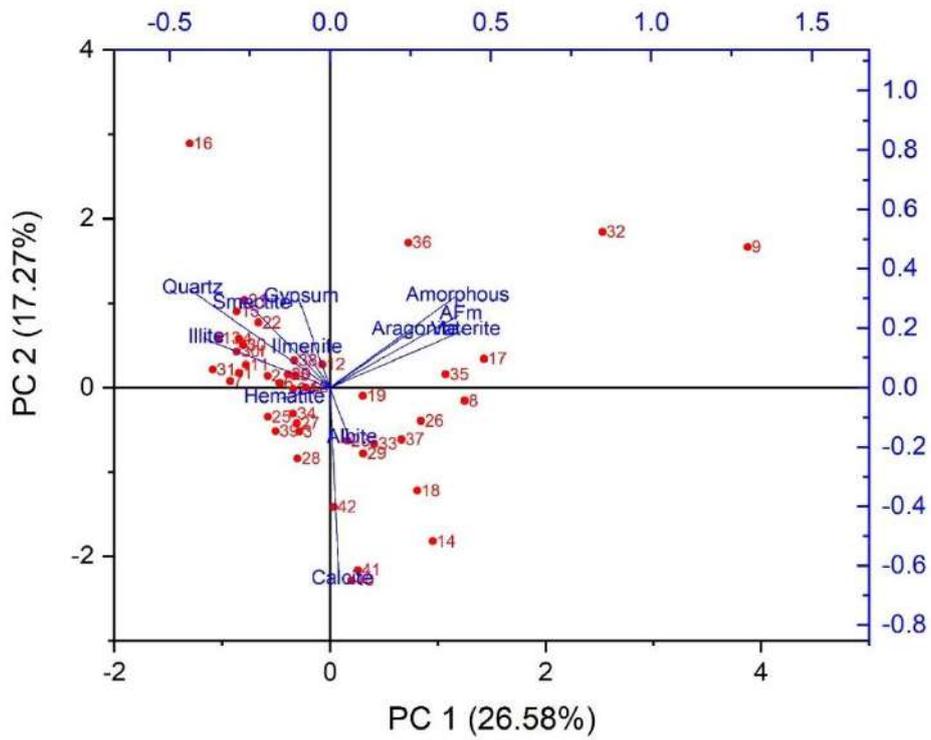


Figura 86 – Analisi delle componenti principali dei dati mineralogici quantitativi, biplot delle prime due componenti principali

Una seconda analisi delle componenti principali effettuata escludendo i sopracitati *outlier* ha permesso di ottenere il *biplot* riportato in Figura 87.

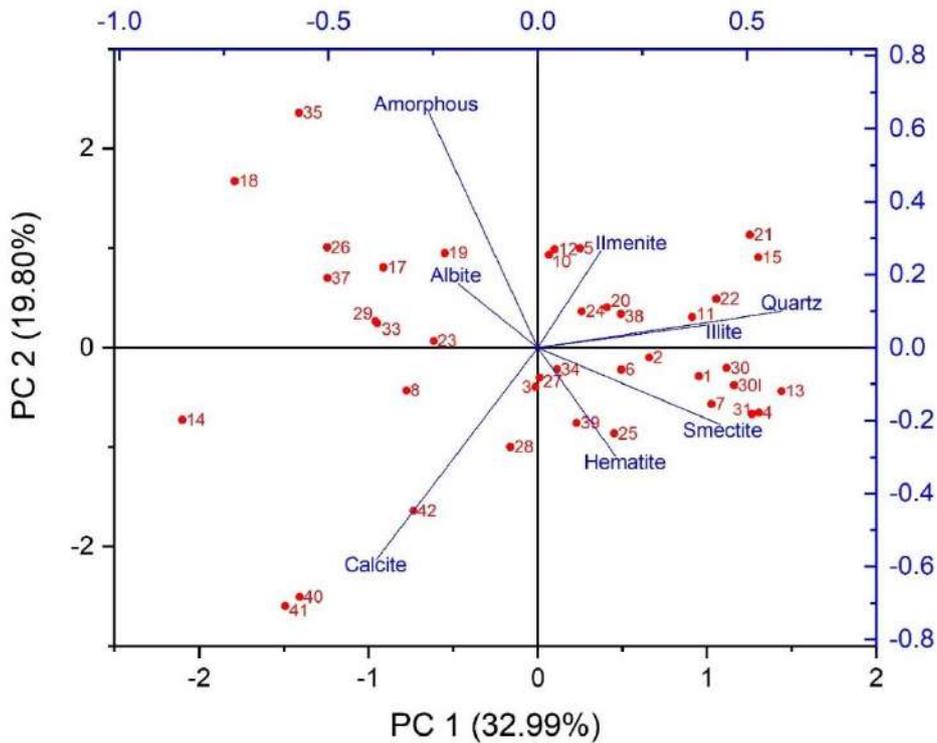


Figura 87 - Analisi delle componenti principali dei dati mineralogici quantitativi, biplot delle prime due componenti principali escludendo i campioni risultati outlier

Pur risultando fortemente concentrato, il dataset così elaborato ha permesso la definizione di tre gruppi.

Un primo e più consistente raggruppamento (campioni SB_01, SB_02, SB_03, SB_04, SB_05, SB_06, SB_07, SB_10, SB_11, SB_12, SB_13, SB_15, SB_20, SB_21, SB_22, SB_24, SB_25, SB_27, SB_28, SB_30, SB_30I, SB_31, SB_34, SB_38, SB_39) è caratterizzato da valori positivi o al massimo blandamente negativi di PC1, e si correla positivamente con quantitativi di quarzo, minerali argillosi ed ossidi più rilevanti rispetto ai rimanenti campioni.

Un secondo gruppo (SB_08, SB_17, SB_18, SB_19, SB_23, SB_26, SB_29, SB_33, SB_35, SB_37), comprendente principalmente campioni provenienti dal campanile, è caratterizzato da valori negativi di PC1 e positivi o al massimo blandamente negativi di PC2. Tali campioni correlano composizionalmente con la fase amorfa, ad indicare una maggior occorrenza di composti argillosi paracrillini e/o composti paracrillini di tipo C-S-H dovuti a processi di reazione idraulica e/o pozzolanica.

Infine, i due campioni pertinenti alle fasi tardoantiche del complesso (SB_40, SB_41) si differenziano nettamente da tutti gli altri per i valori marcatamente negativi sia di PC1 che di PC2, dovuti ad una forte correlazione con la calcite, che costituisce la quasi interezza dei materiali.

5.1.2 Analisi in microscopia ottica (OM-TL) ed elettronica (SED-EMS)

5.1.2.1 Preparazione dei campioni

Anche per l'analisi in microscopia la preparazione delle sezioni sottili è stata supervisionata dal Dott. Michele Secco, eseguita nei laboratori del dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, ed ha seguito diversi passaggi.

Innanzitutto, si è selezionata una porzione di campione che risultasse rappresentativa. Questa porzione di campione è stata dapprima stabilizzata mediante inglobamento sottovuoto con resina epossidica bicomponente, costituita da resina *Araldite 2020* e indurente in proporzione 10:3. Ciò significa che per 50 ml di Araldite son stati aggiunti 15 ml di indurente e mescolati fino ad ottenere un liquido trasparente.

La porzione di campione è stata posta in un contenitore e su questa viene versata la resina fino a coprire completamente tutto il campione in modo che la resina possa penetrare all'interno e coprire tutti i vuoti (Figura 88). Per facilitare questa operazione, i campioni coperti di resina sono stati posti 10 minuti all'interno di una macchina sottovuoto (Figura 89).



Figura 88 - Campione immerso nella resina bicomponente



Figura 89 - Inserimento dei campioni sottovuoto

Successivamente, per facilitare l'indurimento della resina che avviene più velocemente ad alte temperature, i campioni vengono messi in forno a 40°C per circa 24 ore (Figura 90). Una volta trascorse le 24 ore, la resina è indurita e dunque i campioni possono essere estratti dai portacampioni (Figura 91).



Figura 90 - Indurimento della resina in forno



Figura 91 - Campioni inglobati

Successivamente, si procede con il taglio dei campioni ad umido mediante l'utilizzo di una troncatrice petrografica con lama diamantata a corona, visibile in Figura 92. È opportuno osservare il campione per individuare la sezione con più materiale dove effettuare il taglio e, in seguito, si procede con il taglio. Al termine del taglio si asciuga il campione con aria compressa e si verifica se sono presenti dei vuoti o se la resina è inglobata bene nel campione. Si può, quindi, procedere con la scelta di una delle due metà di ogni campione per proseguire con la preparazione (Figura 93). La scelta si basa sulla rappresentatività del campione: viene scelta la metà dove è presente più campione e laddove ci sia un buon rapporto tra legante e aggregato.

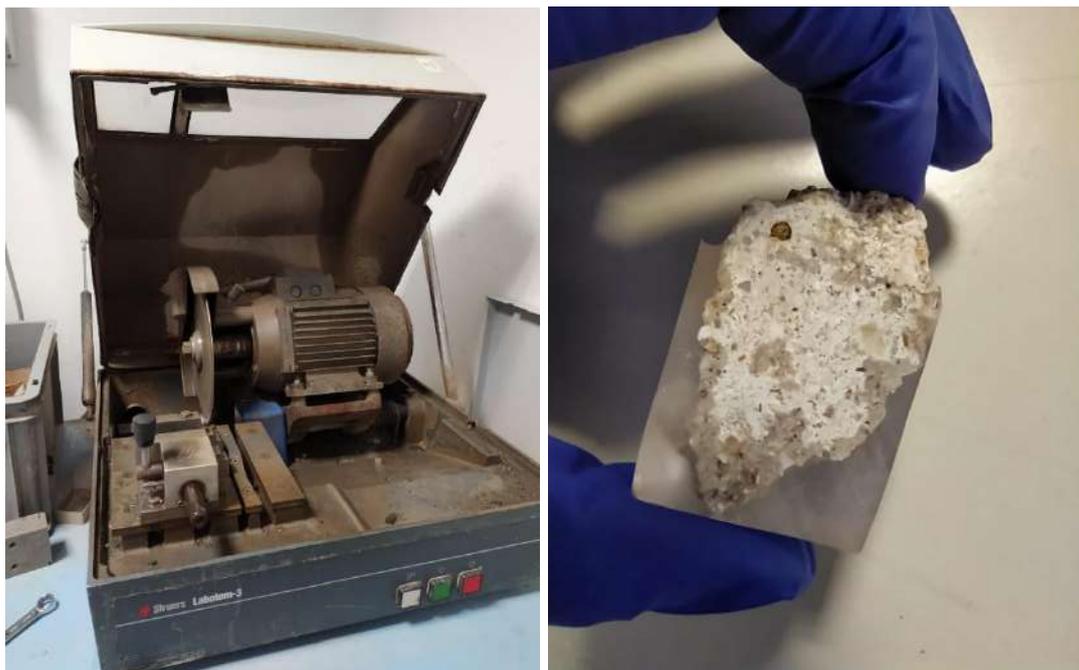


Figura 92 - Taglio dei campioni ad umido



Figura 93 - Campioni tagliati

Sulle metà di campioni scelte è necessario rimuovere la resina sovrabbondante dalla superficie mediante l'utilizzo di un macchinario con carta abrasiva ad umido di diverso spessore. Successivamente, si è proceduto con la lappatura manuale su un piatto di vetro ricoperto di polvere di carburo di silicio e acqua (Figura 94). A questo punto i campioni sono pronti per l'incollaggio del vetrino (Figura 95) e il successivo retrotaglio.



Figura 94 – Lappatura manuale con polvere di carburo di silicio e acqua



Figura 95 – Incollaggio del vetrino

5.1.2.2 Risultati analisi petrografiche in microscopia ottica (OM-TL)

Le analisi microscopiche su sezioni trasversali e sottili hanno permesso di ottenere una più efficace discriminazione dei campioni rispetto a quanto restituito dalle analisi mineralogiche. Nello specifico, è stato possibile definire sette gruppi composizionali caratterizzati da proprietà affini, in seguito descritti. Ogni gruppo contiene campioni simili, spesso anche in riferimento alla posizione in cui sono stati prelevati, riferibili ad un determinato periodo storico confermato dalle analisi che seguono.

Gruppo 1 (campioni SB_11, SB_13, SB_15, SB_16, SB_20, SB_21, SB_22, SB_27, SB_30, SB_30I, SB_32, SB_37)

Il Gruppo 1 comprende tutti i campioni prelevati in facciata, lungo le pareti delle navate e nei transetti, e sono da ascrivere presumibilmente alla fase costruttiva principale di epoca cinquecentesca. Le malte sono distinguibili macroscopicamente per il colore di massa grigiastro/arancio rosa, un aspetto dimensionale conglomeratico grossolano e per la moderata coesione. Microscopicamente le malte risultano essere grasse, con rapporti legante/aggregato di 1:1,5. Si tratta generalmente di compositi leganti di buona fattura, con una frazione di aggregato granulometricamente poco selezionata costituita da sabbie di composizione minero-petrografica in linea con quella dei principali affioramenti carbonatici dell'area Norcina e caratterizzate da profili arrotondati a suggerirne l'approvvigionamento fluviale. La matrice legante presenta tessitura microcristallina e struttura omogenea, con colori di interferenza tipici dei minerali carbonatici, ad indicare l'utilizzo di una calce con proprietà aeree, sebbene l'occorrenza di porzioni otticamente estinte non faccia escludere una natura parzialmente idraulica/pozzolonica del legante. Si riporta come esempio in Figura 96 il campione SB_13 appartenente a tale gruppo.

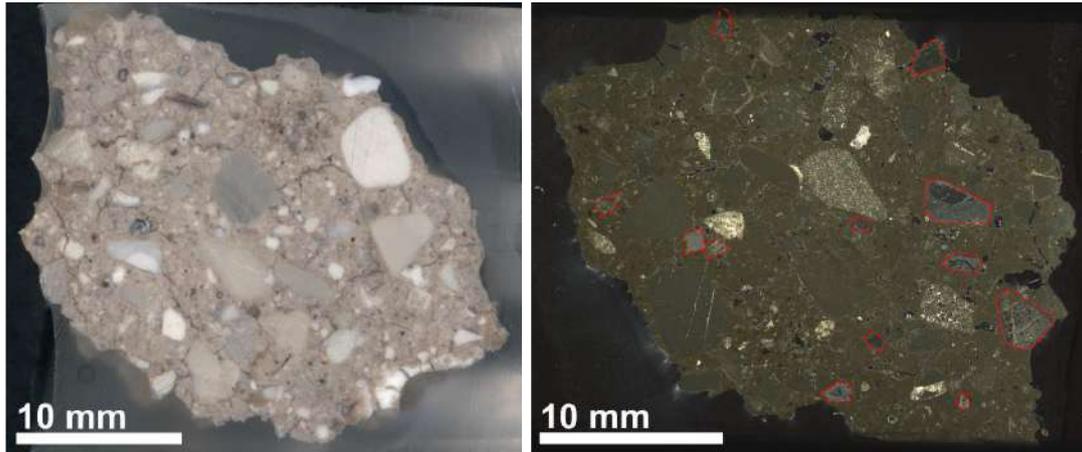


Figura 96 - Campione SB_13, sezione trasversale (sx) e campione SB_13, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols incrociati

Gruppo 2a (campioni SB_01, SB_02, SB_04, SB_05, SB_06, SB_07, SB_14, SB_23, SB_24, SB_28, SB_29, SB_38)

Il Gruppo 2a comprende i campioni ascrivibili alle fodere di murature esterne, costruite a seguito del sisma settecentesco. Le malte di questo gruppo presentano un colore di massa marrone rossastro pallido, un aspetto dimensionale conglomeratico fine e l'alta coesione. Rispetto al gruppo precedente, le malte di questo gruppo si distinguono per la maggior magrezza degli impasti rispetto al gruppo precedente, con un rapporto legante/aggregato di 1:2,5. Presentano inoltre una maggior selezione granulometrica dell'aggregato e per una maggior presenza di porosità capillare. L'aggregato si presenta composizionalmente e tessituralmente affine a quello del gruppo precedente, ad indicare nuovamente un chiaro approvvigionamento locale. La matrice legante presenta tessitura microcristallina e struttura prevalentemente omogenea, con colori di interferenza tipici dei minerali carbonatici ad indicare l'utilizzo di una calce con proprietà aeree, sebbene risultino frequenti porzioni otticamente estinte ad indicare una natura parzialmente idraulica/pozzolonica del legante. Si riporta come esempio in Figura 97 il campione SB_01 appartenente a tale gruppo.

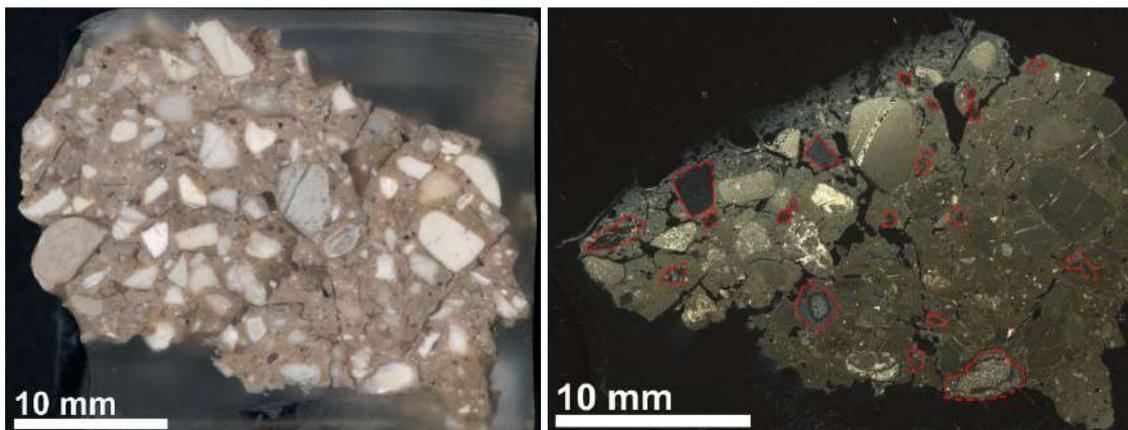


Figura 97 - Campione SB_01, sezione trasversale (sx) e Campione SB_01, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols incrociati

Gruppo 2b (campioni SB_12, SB_17, SB_18, SB_26, SB_33, SB_34, SB_35, SB_42)

Tale gruppo comprende tutti i campioni pertinenti alla porzione alta del campanile, con associato il campione prelevato dal setto murario del campanile che è risultato non ammorsato con il transetto. Anche questo gruppo di malte è attribuibile ai rifacimenti settecenteschi. Essi presentano caratteristiche affini a quelle del gruppo 2a, ma una maggiore estinzione ottica delle matrici leganti, a suggerire una natura più eminentemente idraulica/pozzolonica del legante utilizzato. Inoltre, la porosità risulta sensibilmente inferiore rispetto a quella osservata nei campioni del gruppo precedente. Si riporta come esempio in Figura 98 il campione SB_17 appartenente a tale gruppo.

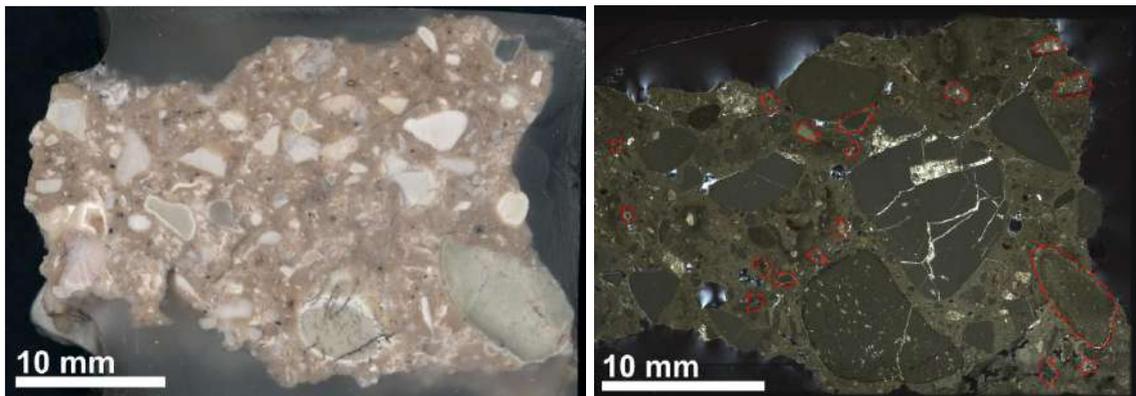


Figura 98 - Campione SB_17, sezione trasversale (sx) e Campione SB_17, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols incrociati

Gruppo 3 (campioni SB_08, SB_09, SB_36)

Il Gruppo 3 comprende campioni appartenenti al basamento del campanile, di probabile attribuzione trecentesca. Le malte presentano un colore di massa grigiastro/arancio rosa, un aspetto dimensionale conglomeratico fine e una coesione molto alta. Tali materiali risultano estremamente tenaci, grazie alla grassezza degli impasti (rapporto legante/aggregato 1:1,5) e alla distribuzione polidispersa della frazione inerte, di derivazione locale, che ha permesso di colmare efficacemente gli interstizi tra particelle a varia granulometria. La matrice legante presenta tessitura microcristallina e struttura disomogenea, con abbondanti porzioni otticamente estinte ad indicare una natura eminentemente idraulica/pozzolonica del legante. Si riporta come esempio in Figura 99 il campione SB_09 appartenente a tale gruppo.

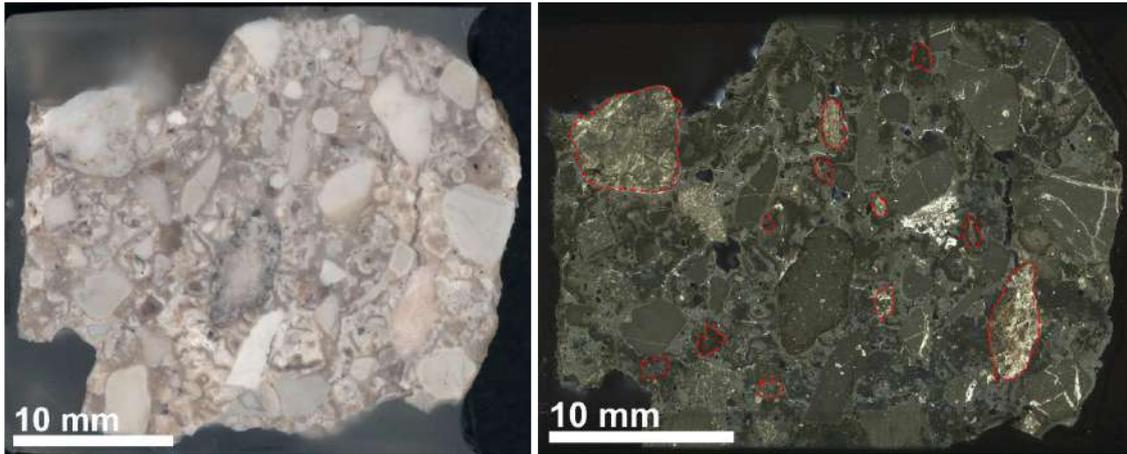


Figura 99 - Campione SB_09, sezione trasversale (sx) e Campione SB_09, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols incrociati

Gruppo 4 (campioni SB_03, SB_25)

Tali campioni sono pertinenti ai nuclei murari della parete sinistra della navata. Le malte sono distinguibili macroscopicamente per il colore di massa arancio rossastro moderato, per un aspetto conglomeratico dimensionale grossolano e per la moderata coesione. Tali malte risultano magre, con rapporto legante/aggregato di 1:3. Sono composte da un aggregato granulometricamente polidisperso di derivazione locale, con abbondante frazione stilosa. La matrice legante presenta tessitura microcristallina e struttura marcatamente eterogenea, con presenza di aree a colori di interferenza tipici dei minerali carbonatici associate a diffuse porzioni otticamente estinte ad indicare una natura parzialmente idraulica della calce utilizzata. Si riporta come esempio in Figura 100 il campione SB_25 appartenente a tale gruppo.



Figura 100 - Campione SB_25, sezione trasversale (sx) e Campione SB_25, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols incrociati

Gruppo 5 (campioni SB_10, SB_19, SB_31, SB_39)

I campioni di questo ultimo gruppo sono pertinenti al muro addossato al basamento del campanile e al lacerto si parete della navata destra in corrispondenza del Portico delle Misure. Le malte appartenenti a questo gruppo presentano un colore di massa grigio/giallastro, un aspetto dimensionale conglomeratico grossolano e una scarsa coesione. Microscopicamente, le malte risultano magre con rapporti legante/aggregato di 1:3. Si tratta di malte caratterizzate da peggiori proprietà tessiturali, come denotato *in primis* dall'elevata porosità, dell'ordine del 10-12% sul

totale del volume, con un'associazione di vacui irregolari con dimensioni medie di 2 mm e fessurazioni dendritiche. La matrice legante presenta tessitura microcristallina e struttura omogenea, con colori di interferenza tipici dei minerali carbonatici, ad indicare l'utilizzo di una calce prevalentemente aerea. Si riporta come esempio in Figura 101 il campione SB_10 appartenente a tale gruppo.



Figura 101 - Campione SB_10, sezione trasversale (sx) e campione SB_10, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols paralleli

Gruppo 6 (campioni SB_40, SB_41)

Tali campioni sono pertinenti alle fasi costruttive tardoantiche del complesso, localizzate al livello della cripta. Le malte sono distinguibili macroscopicamente per il colore di arancio/rossastro moderato, per l'aspetto dimensionale conglomeratico grossolano e per la moderata coesione. Microscopicamente, le malte risultano magre con rapporti legante/aggregato di 1:3. La matrice legante presenta tessitura microcristallina e struttura omogenea, con colori di interferenza tipici dei minerali carbonatici, ad indicare l'utilizzo di una calce prevalentemente aerea. Si riporta come esempio in Figura 102 il campione SB_41 appartenente a tale gruppo.

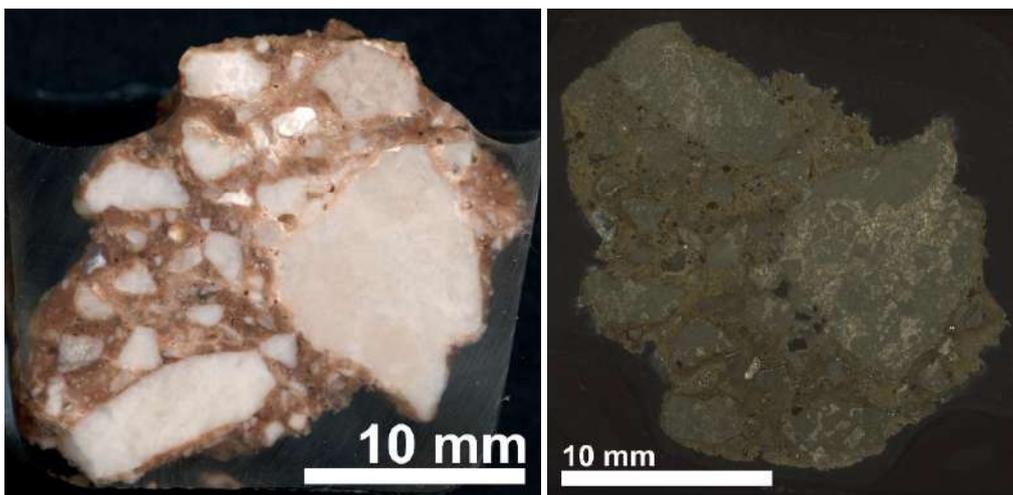


Figura 102 - Campione SB_41, sezione trasversale (sx) e campione SB_41, micrografia ottica a luce trasmessa, nicols incrociati

5.1.2.3 Risultati analisi microstrutturali e microchimiche in microscopia elettronica a scansione con associata microanalisi chimica in fluorescenza X a dispersione di energia (SEM-EDS)

Un microscopio elettronico si basa su fenomeni fisici completamente diversi rispetto a quelli di un microscopio standard. L'immagine derivante da un microscopio elettronico è un'immagine in bianco e nero ad alto ingrandimento che permette di comprendere al meglio la composizione del materiale. Si tratta, infatti, dell'immagine derivante dall'interazione tra fasci elettronici e il materiale. Le gradazioni di grigio che si possono vedere sono legate al *numero atomico n* del materiale. Più il colore è chiaro, più questo indica la presenza di elementi pesanti nel materiale, più e scuro più gli elementi sono leggeri. Ai due estremi, quindi, il nero individua i pori, dunque le porosità e le parti più chiare sono gli aggregati, con un numero atomico più alto rispetto a quello della frazione legante.

Quello che emerge a seguito dell'analisi di tutti i campioni di malta, e che verrà spiegato nel dettaglio per ogni gruppo di campioni individuato già a seguito di microscopia ottica, è che in quasi tutti i campioni è presente un quantitativo più o meno elevato di Silicio (Si), escludendo i campioni appartenenti all'ultimo gruppo e riferibili a malte tardo antiche.

Se si è di fronte un campione costituito da malta aerea standard (quale la calce) non si dovrebbero avere componenti di Silicio (Si) all'interno del campione, ma solo presenza di Calcio (Ca). Se si individua, invece, la presenza del Silicio siamo di fronte ad una calce idraulica. I campioni prelevati nella Basilica di San Benedetto contengono quasi tutti quantitativi più o meno elevati di Silicio (Si) e quindi siamo di fronte a malte parzialmente idrauliche, come già emerso a seguito dell'analisi dei materiali leganti in microscopia ottica. È possibile, inoltre, collimare il fascio elettronico in un punto, in modo da ottenere uno spettro in cui è possibile individuare dei picchi corrispondenti ad un determinato elemento e l'area integrata del picco individuato corrisponde alla sua quantità.

Dalle analisi in microscopia elettronica si è potuto osservare, inoltre, la presenza di numerosi relitti di selce (quarzo microcristallino) con evidenti alterazioni da stress termico. Questa caratteristica permette di ipotizzare l'utilizzo di un calcare selcifero come pietra da calce, con conseguente formazione di fasi idrauliche per reazione tra la componente silicatica e carbonatica della materia prima, a temperature di esercizio del forno da calce intorno ai 900°C. Mediante questa reazione si formano, quindi, silicati idrati di calcio (CSH). L'approvvigionamento di una pietra da calce di tale tipologia risulta perfettamente compatibile con il territorio Norcino, caratterizzato da numerosi affioramenti di maiolica, un calcare bianco ricco di lenti selcifere, localmente definito "*calcare rupestre*". Questo elemento sta ad indicare una lavorazione più spinta del materiale, quasi a volerne migliorare le sue proprietà.

Gruppo 1 (campioni SB_11, SB_13, SB_15, SB_16, SB_20, SB_21, SB_22, SB_27, SB_30, SB_30I, SB_32, SB_37)

Le malte di questo gruppo presentano matrici leganti compatte, costituite da aggregati di fasi microcristalline a morfologia globulare (Figura 103). Le microanalisi EDS hanno evidenziato una composizione prevalentemente calcica, con aliquote minoritarie di silicio e alluminio (Figura 104).

L'indice di idraulicità medio risulta pari a 0,27, compreso nell'intervallo tipico di calci mediamente idrauliche.

Inoltre, analisi sui clasti di selce hanno evidenziato l'influenza degli effetti termici sulla microstruttura delle particelle e la formazione di fessurazioni dendritiche da stress termico sulla porzione interfacciale dei clasti.

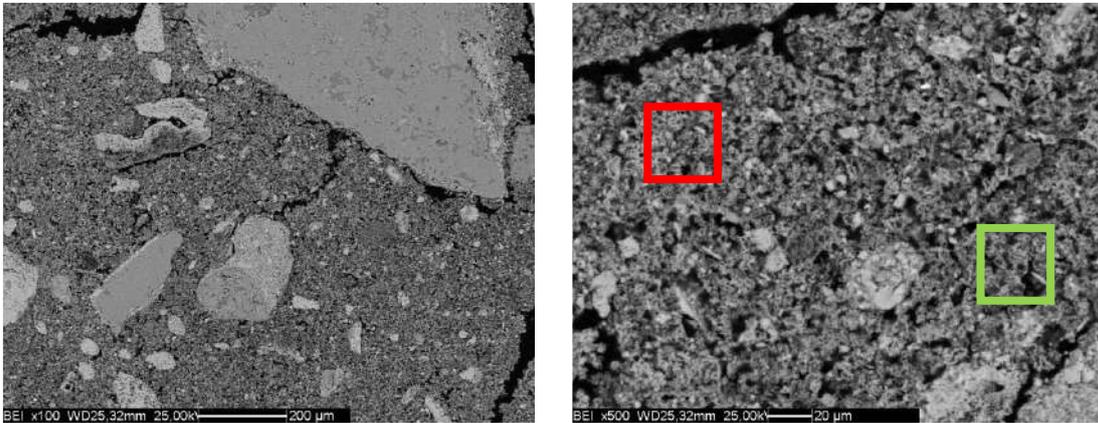


Figura 103 - Campione SB_13, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

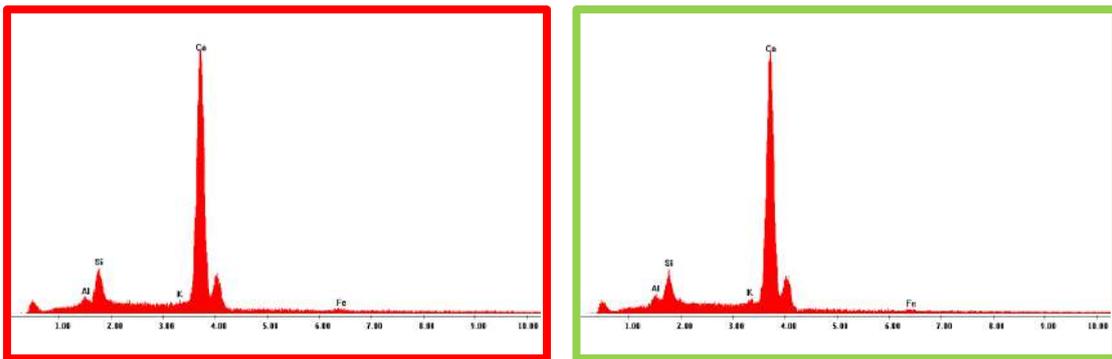


Figura 104 - Campione SB_13, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 103

Gruppo 2a (campioni SB_01, SB_02, SB_04, SB_05, SB_06, SB_07, SB_14, SB_23, SB_24, SB_28, SB_29, SB_38)

Le malte di questo gruppo presentano matrici leganti compatte (Figura 105) e composizioni chimiche date da dominante calcio e associati silicio ed alluminio (Figura 106). L'indice di idraulicità medio risulta pari a 0.54, tipico per calci eminentemente idrauliche.

Come osservato per i campioni precedenti anche tali materiali contengono numerosi granuli di selce con segni di stress termico, in forma di margini di alterazione a porosità incrementata.

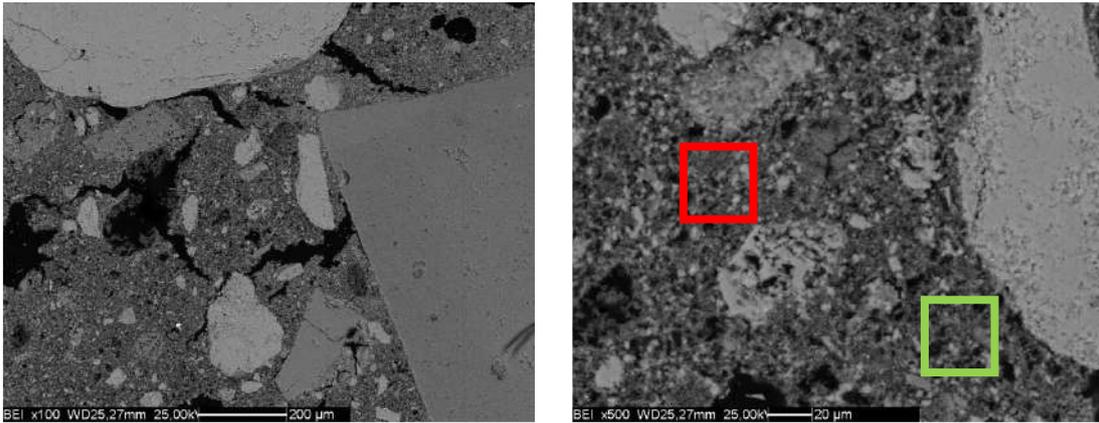


Figura 105 - Campione SB_07, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

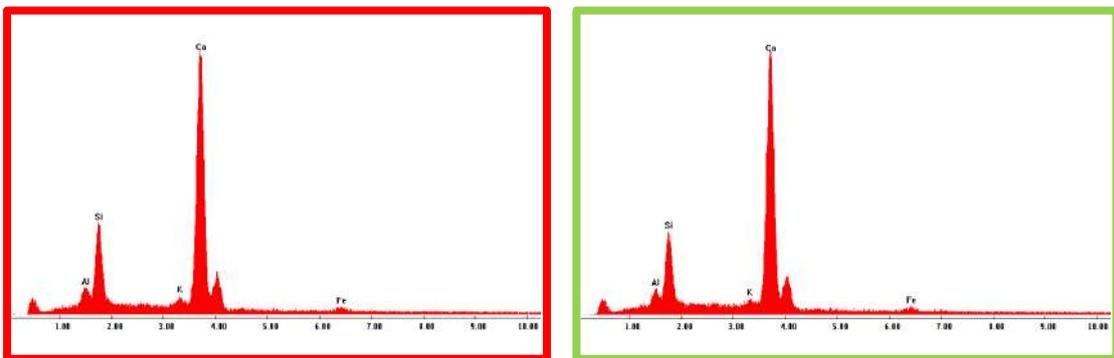


Figura 106 - Campione SB_07, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 105

Gruppo 2b (campioni SB_12, SB_17, SB_18, SB_26, SB_33, SB_34, SB_35, SB_42)

Anche per questo gruppo, come per il precedente, siamo di fronte a malte che presentano matrici leganti molto compatte (Figura 107) con composizioni chimiche date da dominante calcio ed associati silicio e alluminio (Figura 108). A differenza del gruppo precedente i valori di silicio e alluminio sono sensibilmente più alti, comportando un aumento del valore dell'indice di idraulicità, pari a 0,72.

In tale gruppo di campioni, i clasti di selce mostrano effetti di alterazione termica ulteriormente più spinti, con presenza di ampi margini caratterizzati da profonda dissoluzione della matrice silicatica.

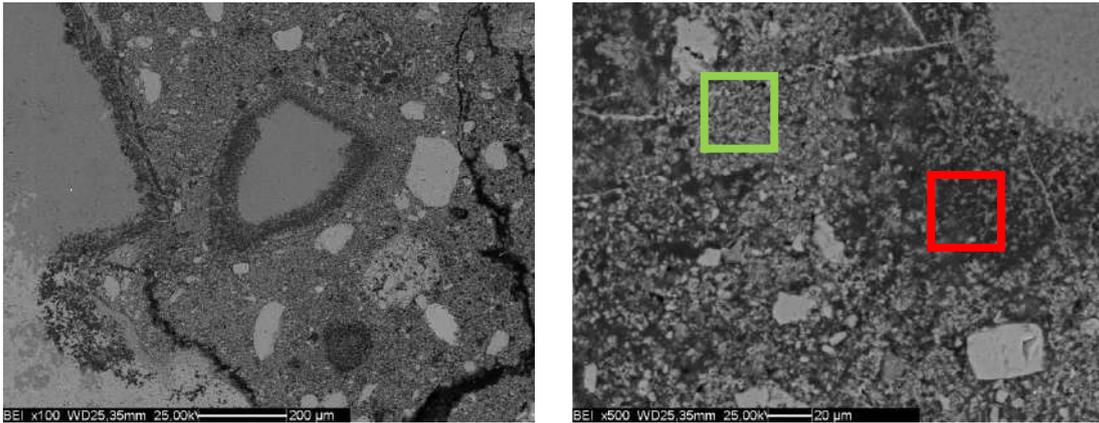


Figura 107 - Campione SB_12, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

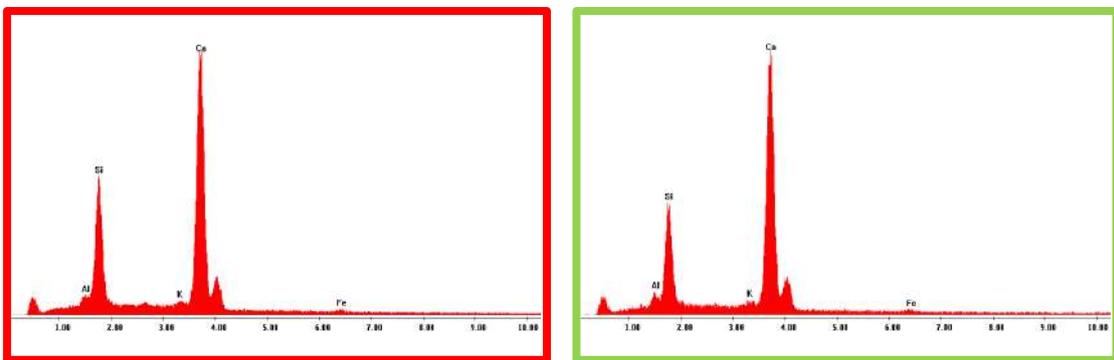


Figura 108 - Campione SB_12, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 107

Gruppo 3 (campioni SB_08, SB_09, SB_36)

I campioni appartenenti a questo gruppo presentano malte con matrici leganti estremamente compatte (Figura 109) con composizioni chimiche variabili: in alcuni punti sono costituite da dominante calcio e valori alti di silicio, in altri casi i due valori sono confrontabili (Figura 110). Ciò comporta il fatto che le malte presentano indici di idraulicità molto maggiori rispetto a quelli dei campioni dei gruppi precedenti, con valore medio di 1,13. In tale gruppo, oltre alla presenza di clasti di selce con effetti di alterazione termica molto spinti, si può rilevare anche la presenza di calcinaroli caratterizzati da eterogeneità chimiche e tessiture tipiche di calci idrauliche.

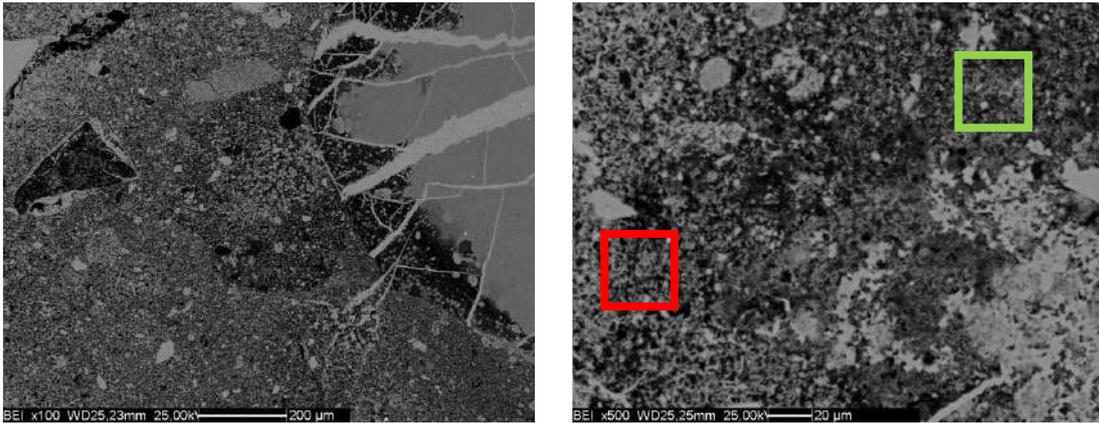


Figura 109 - Campione SB_08, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

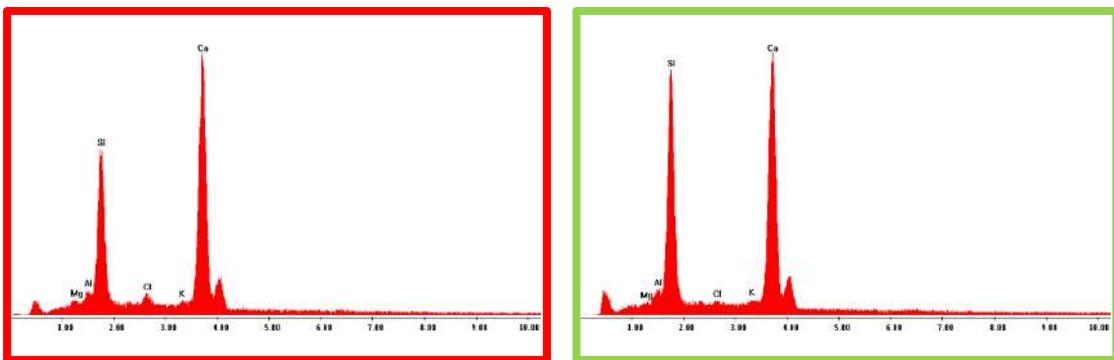


Figura 110 - Campione SB_08, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 109

Gruppo 4 (campioni SB_03, SB_25)

Le malte di questo gruppo presentano matrici leganti compatte (Figura 111) con composizioni chimiche date da dominanti calcio e silicio associati ad alluminio, con aliquote minoritarie ma chiaramente rilevabili di alcali, magnesio, ferro, zolfo e cloro (Figura 112). L'indice di idraulicità medio risulta pari a 1,11, tipico di calci eminentemente idrauliche.

Le malte di tale gruppo presentano abbondanti relitti di calcinazione, in forma di clasti di selce fortemente reagiti per effetto termico, con abbondanti microfratture.

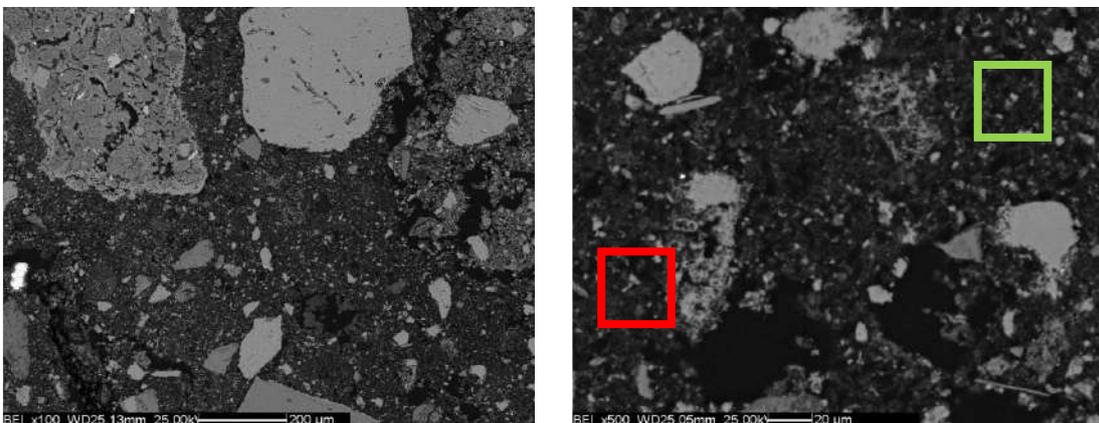


Figura 111 - Campione SB_03, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

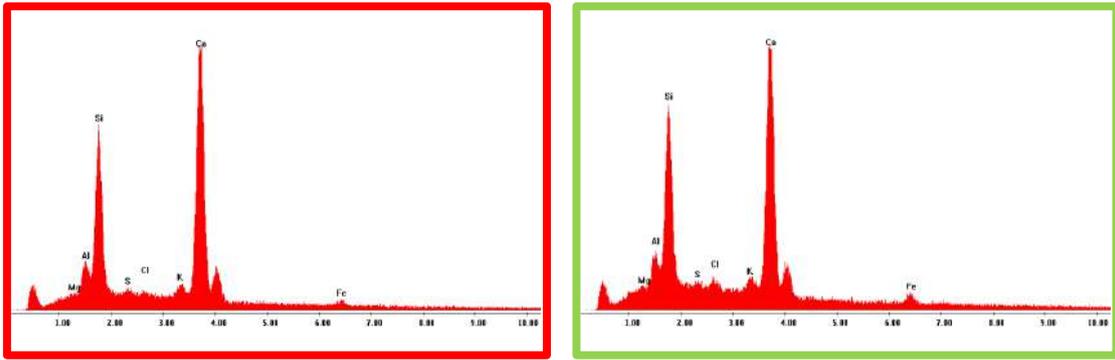


Figura 112 - Campione SB_03, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 111

Gruppo 5 (SB_10, SB_19, SB_31, SB_39)

Le malte di questo gruppo presentano matrici leganti fortemente fratturate e ricche di porosità capillare (Figura 113). Le microanalisi EDS hanno evidenziato una composizione prevalentemente calcica, con aliquote significative ed altamente variabili di silicio ed alluminio, associate a quantitativi rilevanti di potassio e ferro (Figura 114). La disomogeneità composizionale delle matrici e la presenza rilevante di potassio e ferro, tipica per minerali di natura argillosa, permettono di ipotizzare non tanto l'utilizzo di calci dalle proprietà idrauliche, come osservato per i precedenti gruppi, quanto la presenza di significative aliquote argillose disperse nelle matrici leganti, dovute ad una scarsa depurazione della frazione di aggregato prima della miscelazione, se non ad una volontaria aggiunta di frazioni di suolo, per ridurre i costi di manifattura dei leganti. I clasti di selce presenti all'interno dei materiali analizzati, a differenza di quanto osservato per i precedenti campioni, risultano totalmente privi di fratturazioni interfacciali da stress termico e di variazioni dei profili composizionali indicative della formazione di silicati di calcio.

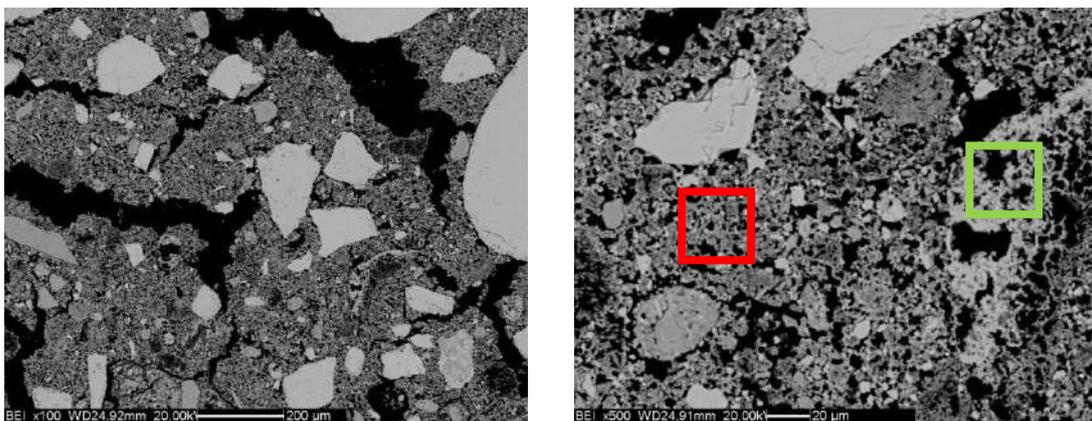


Figura 113 - Campione SB_31, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

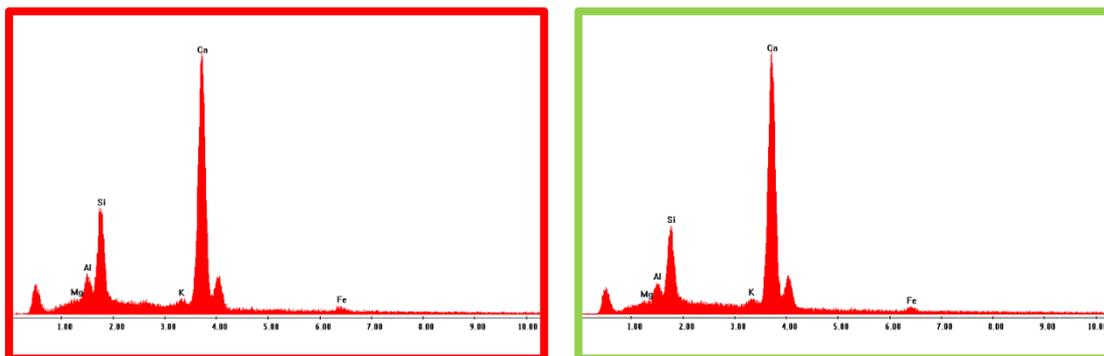


Figura 114 - Campione SB_31, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 113

Gruppo 6 (SB_40, SB_41)

Le malte di tale gruppo presentano matrici leganti compatte, caratterizzate da ridotta microporosità capillare e costituite da aggregati di fasi microcristalline a morfologia globulare a marcato grado di coalescenza (Figura 115). Le microanalisi EDS hanno evidenziato una composizione quasi esclusivamente calcica, con solo tracce di silicio (Figura 116). L'indice di idraulicità medio, pari a 0.08, risulta compreso nell'intervallo tipico per calci eminentemente aeree.

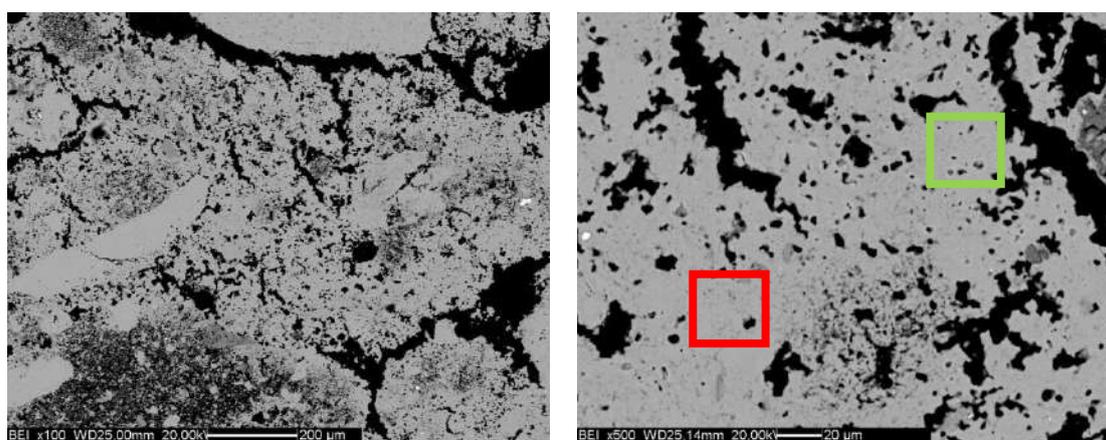


Figura 115 - Campione SB_40, micrografia SEM agli elettroni retrodiffusi SEM-BSE (sinistra) e dettaglio della matrice legante (destra)

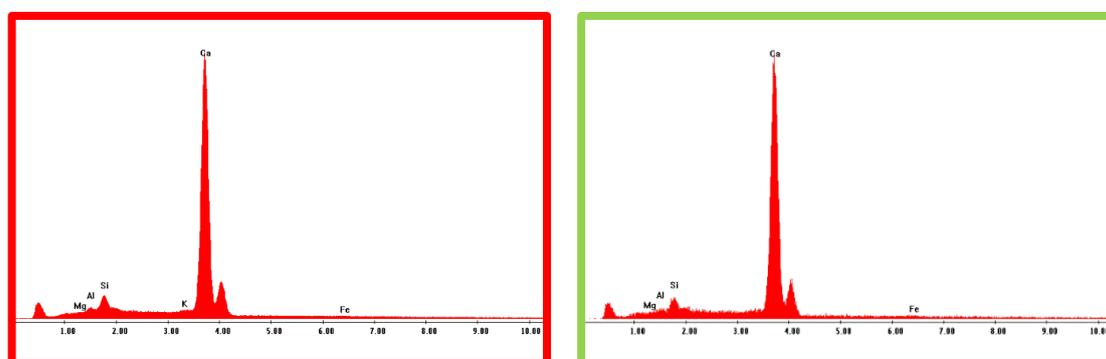


Figura 116 - Campione SB_40, microanalisi EDS dell'area rossa e verde evidenziata in Figura 115

5.2 PROVE SONICHE

Come descritto al Capitolo 2.5.1, le prove soniche rappresentano un metodo di indagine non distruttivo applicabile alle strutture murarie con lo scopo di ottenere informazioni per la caratterizzazione e una descrizione qualitativa della muratura.

Nel caso della Basilica di San Benedetto le prove soniche si sono potute effettuare nella zona della facciata, laddove gli eventi sismici che hanno colpito la Basilica hanno causato il distacco dell'intonaco lasciando quindi spazio per l'indagine. Si è ritenuto inopportuno, in questa fase, rimuovere intonaco in altri punti della muratura al fine di eseguire la prova. Con un'opportuna organizzazione potrebbe essere possibile, durante le operazioni di rinforzo delle murature e qualora una delle fasi preveda la rimozione dell'intonaco staccato, eseguire le indagini soniche pre e post intervento di consolidamento, così da valutarne anche l'efficacia e la buona riuscita. Le prove soniche eseguite in facciata sono state effettuate al fianco del portale, essendo una zona sprovvista di intonaco e una delle poche aree accessibili da entrambi i lati. In questa zona è stato possibile effettuare dapprima una prova sonica diretta e successivamente una tomografia, di cui verranno illustrati in breve i risultati nei paragrafi a seguire.

5.2.1 Prova sonica diretta

La prova sonica diretta è stata realizzata su un'area di indagine di 140x180 cm, con una griglia di spaziatura 20 cm in entrambe le direzioni misurando otto punti su cinque righe. L'estensione in larghezza è stata definita dallo spazio a disposizione in controfacciata, vista la presenza a sinistra del ringrosso murario e a destra di una delle colonne appartenenti alla cantoria (Figura 117).



Figura 117 - Preparazione della griglia per esecuzione della prova sonica diretta

In Figura 118 si osserva il posizionamento esatto della griglia di indagine e le misure relative al primo punto della griglia (punto 1.1) che è stato preso in corrispondenza su entrambi i lati della facciata. Lo spessore della muratura tenuto in considerazione per la calibrazione dei risultati di

prova è di 116 cm, rilevato mediante nuvola di punti *laser scanner*, confrontato con una misura diretta in situ.

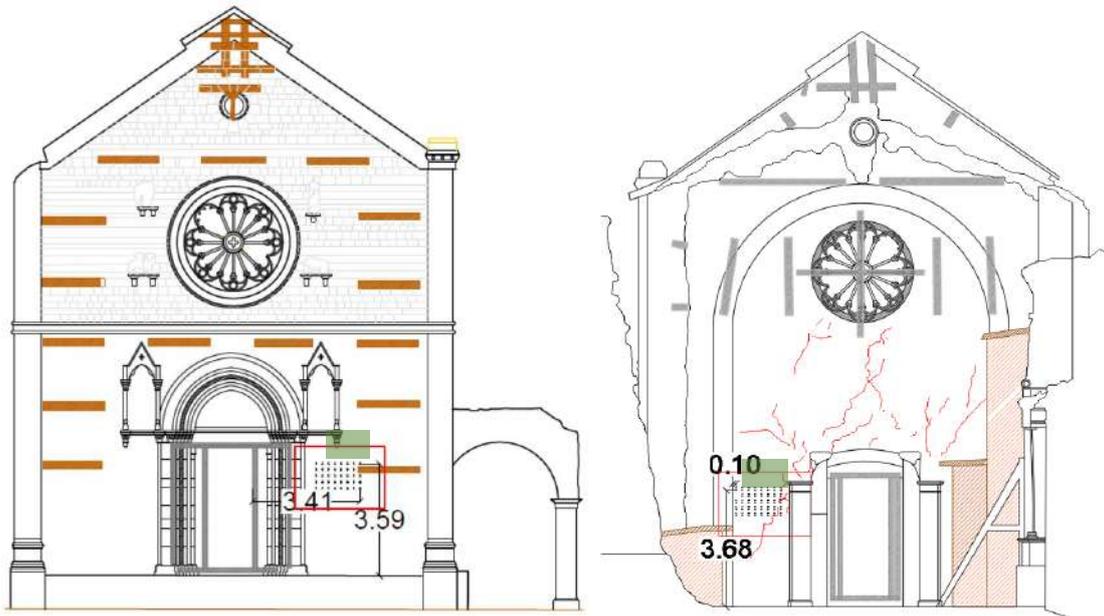


Figura 118 - Posizione della prova sonica diretta in facciata (sinistra) e controfacciata (destra)

Per ciascun punto di battitura, per un totale di 40 punti, si sono ottenuti i relativi tempi di volo. Nell'effettuare la prova si sono eseguite sempre almeno un numero di tre battute (T_a , T_b , T_c) per ogni punto di battitura, in modo da poter ottenere una misura mediata del tempo di volo (T_m) per ciascun punto di prova, valore che risulta essere più affidabile. Si possono osservare i tempi di volo e le velocità relative a ciascun punto di battitura in Tabella presente in Appendice A.

Noto lo spessore della muratura, dalla legge fisica $s = v \cdot t$ si può ricavare la velocità nel mezzo come rapporto tra lo spessore murario e il tempo di volo dell'onda sonica. Mediamente si ottiene una velocità pari a 1571 m/s che non appare però rappresentativa dell'intera muratura in quanto i valori risultano abbastanza dispersi all'interno della zona indagata (Tabella 7).

Tabella 7 – Risultati delle velocità soniche

Velocità media risultante	1571	m/s
Deviazione standard	587	m/s
Coefficiente di variazione	37.39	%

Questo risultato appare molto chiaro osservando la Figura 119 in cui sono riportati gli istogrammi delle velocità. Si può notare che la velocità sonica diminuisce spostandosi, nelle varie righe della griglia, da sinistra verso destra. Anche la mappa dei colori delle velocità soniche, in Figura 120, mostra la stessa situazione evidenziando un decadimento delle velocità soniche in alto a sinistra, con valori minimi anche di 840 m/s.

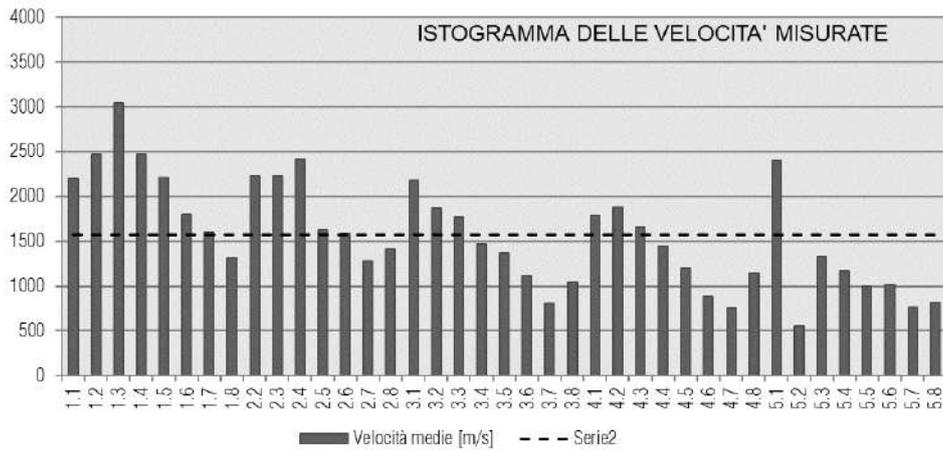


Figura 119 - Istogramma delle velocità misurate e valori medi

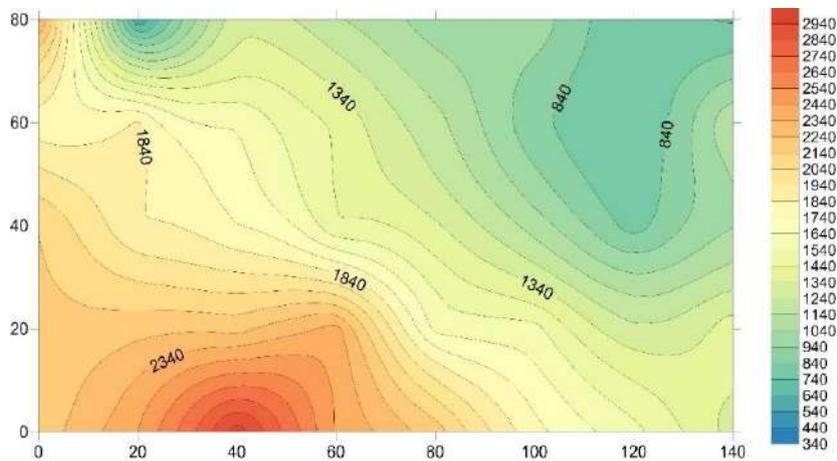


Figura 120 - Mappa delle velocità soniche

La motivazione di tale andamento può essere spiegata attraverso la sovrapposizione della mappa delle velocità soniche con l'effettiva porzione di muratura in controfacciata dove si è eseguita la prova (si veda Figura 121). Si può osservare chiaramente una correlazione tra il quadro fessurativo presente nel punto della prova e le velocità soniche, le quali diminuiscono in presenza di vuoti o murature fessurate.

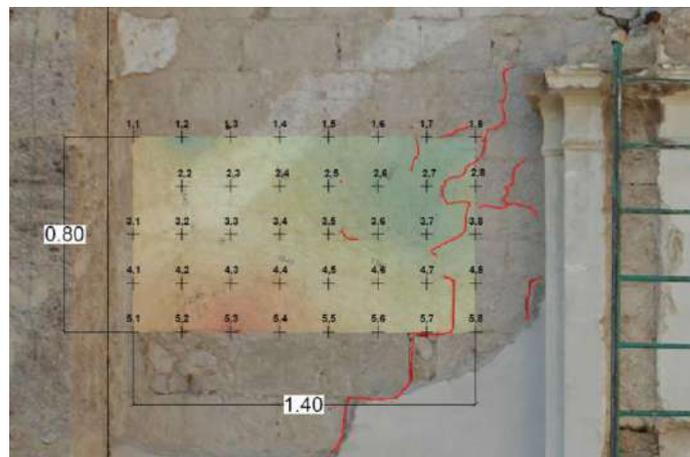


Figura 121 - Sovrapposizione mappe di velocità soniche in controfacciata e confronto con quadro fessurativo rilevato

In conclusione, a seguito della prova sonica diretta si può osservare che la muratura della facciata in zona non danneggiata è una muratura di buona qualità, in quanto presenta valori medi pari a circa 2000 m/s. Allo stesso tempo, però, emerge come le fessurazioni presenti a seguito dello sciame sismico del 2016 coinvolgano la muratura nell'intero spessore, anche se questo dato non è riscontrabile visivamente sulla facciata, e che sembrano interessare zone di muratura più ampia rispetto alla fessura visibile, probabilmente a seguito del danneggiamento delle zone limitrofe.

5.2.2 Prova sonica tomografica

L'indagine tomografica è stata svolta lungo la linea centrale (riga 3) della prova sonica diretta, come visibile in Figura 122. Lo scopo di questo tipo di indagine è di avere un'informazione estesa in sezione delle velocità soniche in quanto la prova sonica diretta riporta la velocità media di attraversamento dello spessore murario senza tener conto però di possibili disomogeneità all'interno dello spessore murario.



Figura 122 - Prova sonica tomografica, accelerometri posizionati in facciata

Anche in questa prova vengono effettuate tre misurazioni per ciascun percorso analizzato. In questo caso ogni battitura viene ricevuta in tutti gli 8 punti corrispondenti in cui sono posizionati gli accelerometri, componendo una matrice di tracciati, come da Figura 123. Si possono osservare i tempi di volo di ciascuna traiettoria investigata in Tabella presente in Appendice A.

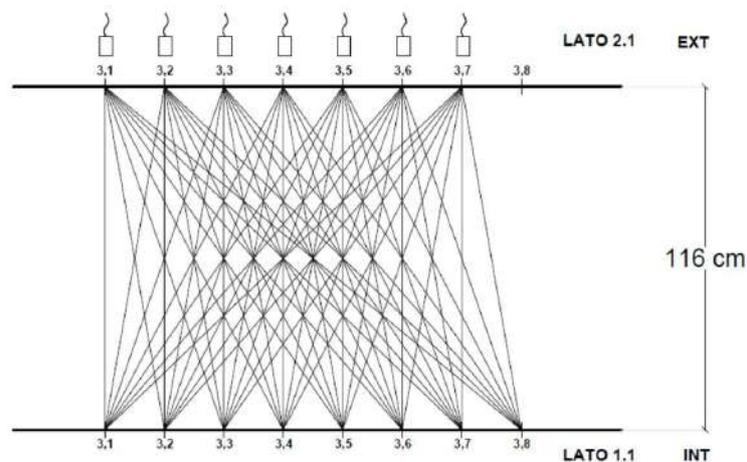


Figura 123 - Percorsi sonici acquisiti nella tomografia (EXT facciata - INT controfacciata)

L'estesa copertura di ciascuna area della sezione viene successivamente elaborata secondo una procedura automatica implementata [Cescatti et al., 2019] che restituisce una distribuzione delle velocità in sezione.

Si può osservare in Figura 124 la distribuzione delle velocità soniche in sezione. Anche in questo caso si nota una zona caratterizzata da velocità soniche fortemente ridotte che evidenziano una zona danneggiata. Si conferma quindi quanto rilevato dalla prova sonica diretta, e quindi la presenza di una fessura passante in quel punto della muratura.

Risulta interessante osservare, inoltre, come le velocità soniche siano leggermente maggiori nella parte più alta della mappa di colori, corrispondente al paramento esterno della facciata, piuttosto che nella parte bassa, corrispondente alla muratura in controfacciata.

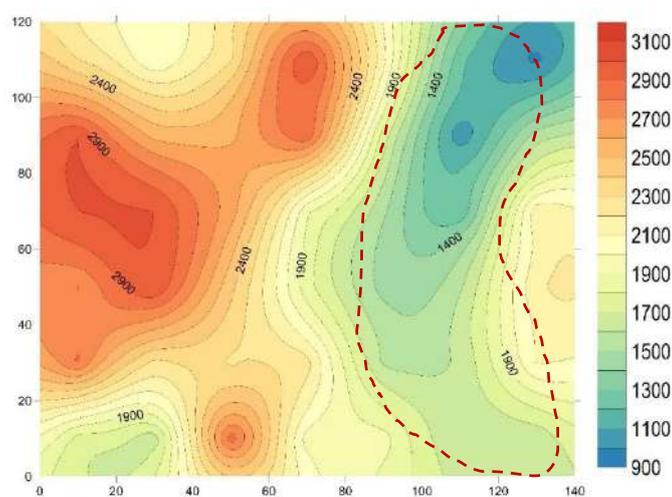


Figura 124 - Mappa delle velocità soniche relativa alla tomografia

5.3 CAROTAGGI E VIDEO-ENDOSCOPIE

In occasione della campagna di indagini in *situ* sono state realizzate delle video-endoscopie per potere ispezionare parti della sezione muraria altrimenti non accessibili. Nella Basilica si sono realizzati un totale di 4 carotaggi, distribuiti tra transetto e abside (Figura 125), tutti effettuati in corrispondenza delle prove con georadar.

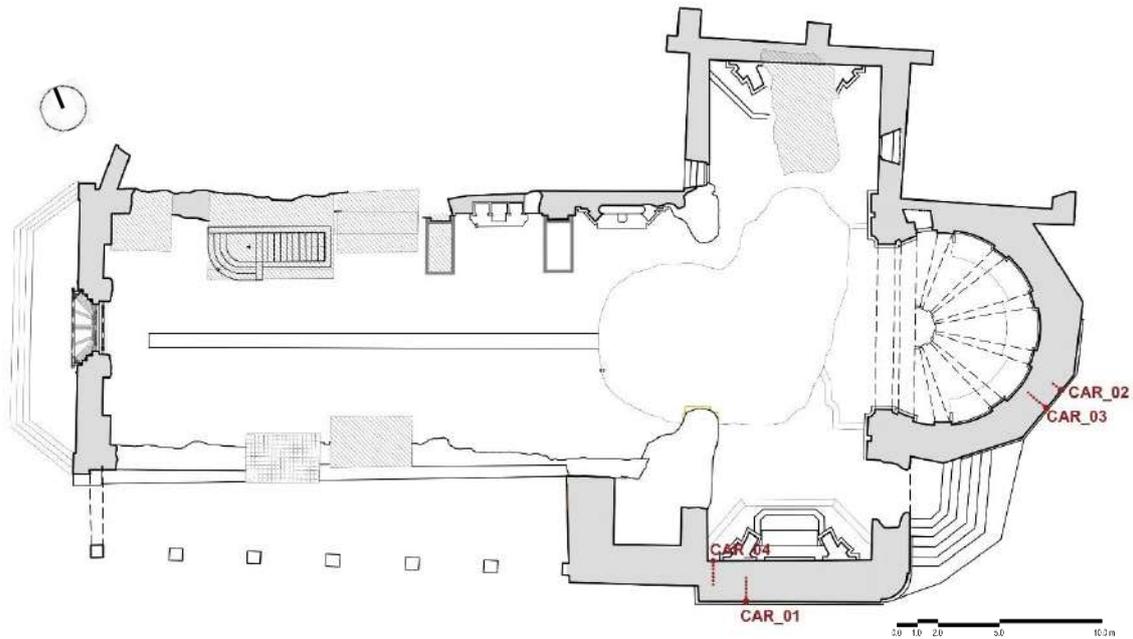


Figura 125 - Localizzazione in pianta dei carotaggi abbinati ad endoscopia eseguiti nella Basilica di San Benedetto

In Appendice D, in particolare nelle tavole da T06 a T08, sono presenti nel dettaglio tutti i carotaggi effettuati, riportando per ogni carotaggio l'acquisizione fotografica mediante endoscopio del paramento murario interno ogni 10 cm. Per ogni carotaggio sono presenti quindi circa 12 immagini che descrivono la prova.

Vista l'importanza di determinare la stratigrafia della muratura l'indagine endoscopica è stata abbinata a dei micro-carotaggi, una prova debolmente distruttiva e quindi eseguita in zone opportune della Basilica. La perforazione è stata realizzata con un trapano con punta di diametro 36 mm avente una profondità massima 120 cm (Figura 126). In un paio di punti la realizzazione del foro di indagine non è stata possibile in quanto andava a rifiuto.



Figura 126 - Esecuzione foro d'ispezione per indagine con endoscopio nel transetto della Basilica di San Benedetto

5.3.1 Transetto

Nella zona del transetto sono stati eseguiti due carotaggi abbinati a video endoscopia, che di seguito saranno indicati con il nome di CAR_01 e CAR_04.

Il primo carotaggio (CAR_01) è stato eseguito sul muro esterno del transetto destro, lungo via Mazzini. Il carotaggio è posizionato ad un'altezza dalla quota della strada di 3,70 m e dista dallo spigolo sinistro del transetto di 2,30 m circa, come visibile da Figura 127 e Figura 128. La sua posizione corrisponde ad un'indagine con radar, in particolare tra la terza e quarta strisciata effettuata sul transetto.

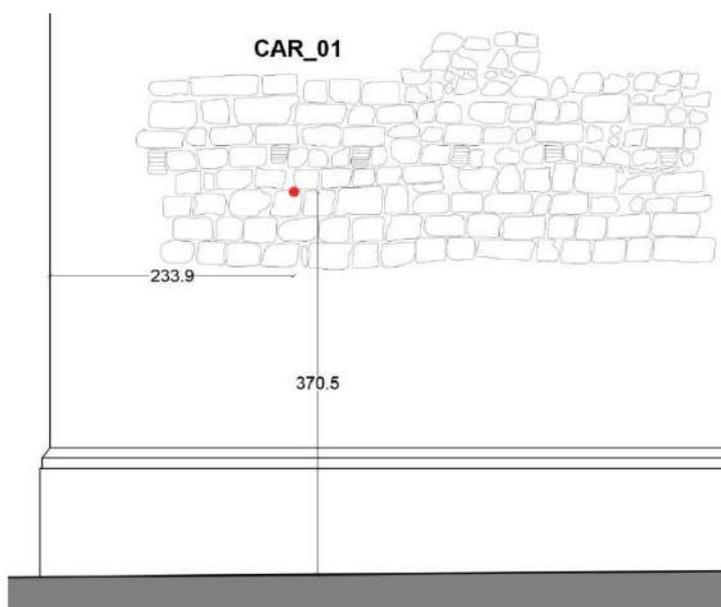


Figura 127 - Posizionamento carotaggio - Transetto - Prospetto Lato Portico delle Misure, su Via Mazzini



Figura 128 - Foto del carotaggio CAR_01 dall'esterno

In Figura 129 si riporta lo schema di quanto rilevato mediante endoscopia effettuata nella perforazione. Si può notare come la muratura per circa i primi 30 cm dall'esterno corrisponda con la muratura visibile in prospetto. Proseguendo verso l'interno si può osservare la presenza di un blocco unico, posizionato di testa, quindi con orientamento diverso dal precedente, che prosegue fino a 70 cm dall'esterno (Figura 131). Per i rimanenti 50 cm del carotaggio si nota che la muratura appare diversa sia come qualità che come tipologia di elementi lapidei.

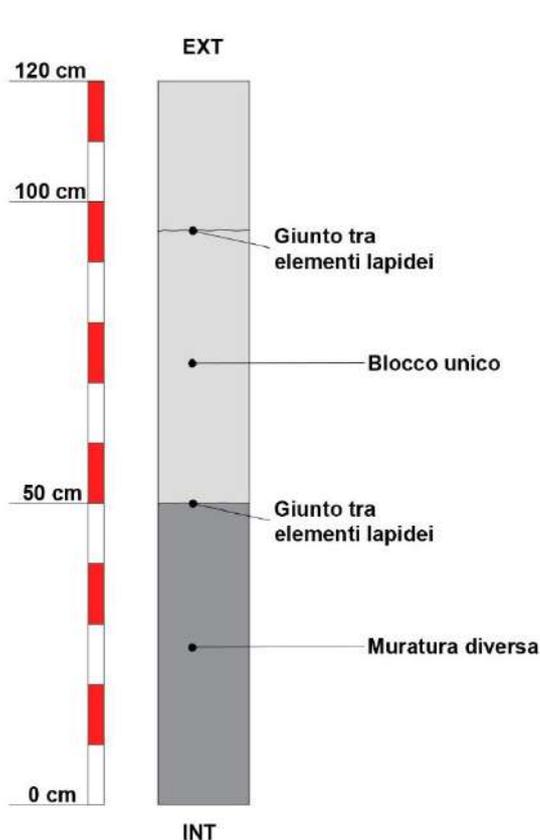


Figura 129 - Schema risultato carotaggio 1



Figura 130 - Foto a 0 cm (120 cm di profondità)



Figura 131 - Foto a 50 cm (70 cm di profondità)

Lo spessore della tipologia muraria esterna risulta di 70 cm, confermando quanto misurato *in situ* nei pressi della nicchia presente sul transetto contenente un affresco (Figura 132). L'indagine sembra quindi confermare quanto riportato dalle fonti storiche che vedono l'ispessimento dei muri di transetto ed abside negli interventi eseguiti post terremoto del 1730. Un'ulteriore conferma di questo ispessimento delle murature deriva da un'osservazione eseguita durante la campagna di indagini nella muratura all'interno della nicchia. Si può osservare, infatti, la presenza di uno strato di intonaco tra le due tipologie murarie, ad indicare la realizzazione delle due murature in modo non coevo (si osservi la zona tratteggiata in rosso in Figura 132).



Figura 132 - Affresco presente sul transetto (sx) e vista dall'interno della nicchia (dx)

Il carotaggio CAR_04 è stato effettuato sempre nella zona del transetto ma dall'interno della Basilica, a lato dell'altare laterale (Figura 133). È posizionato ad una quota da terra di 92 cm e dista dallo spigolo destro del transetto di 42 cm.

Mediante endoscopia effettuata nel foro del carotaggio (Figura 134) si può ricostruire la stratigrafia della muratura (Figura 135) e si può notare come la muratura sembra essere omogenea per i primi 70 cm (Figura 136) e si può riconoscere un giunto tra due diversi elementi lapidei dopo circa 40 cm. Proseguendo verso l'interno, nei rimanenti 50 cm fino a fine foro, si può vedere che la muratura appare diversa, apparentemente degradata e fessurata (Figura 137).

Poiché a quella quota lo spessore del muro del transetto è pari a 153 cm il confronto con il carotaggio CAR_01 permette di valutare la presenza di due paramenti murari diversi che compongono la muratura del transetto e che risultano compatibili in termini dimensionali 80 cm (interno) e 73 cm (esterno).

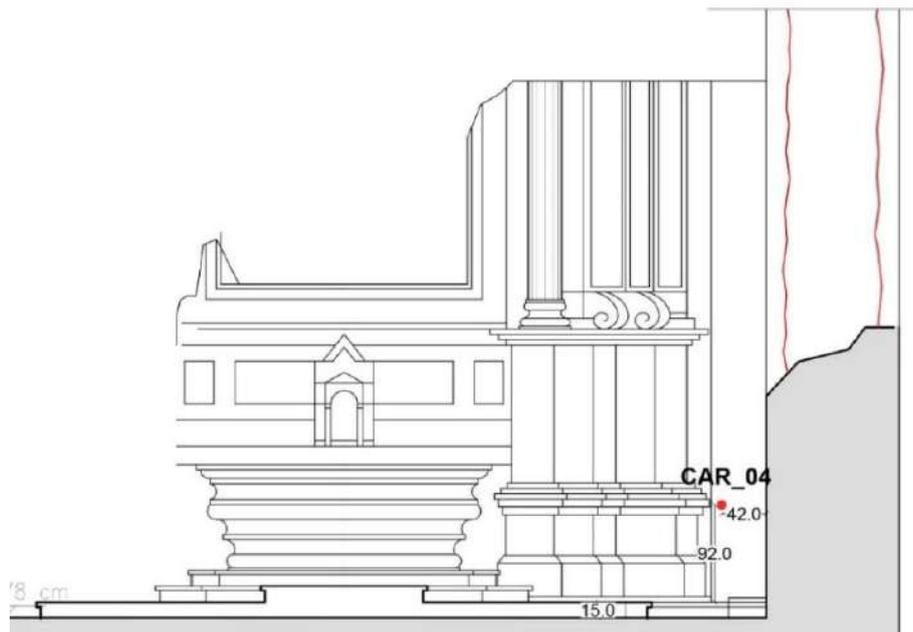


Figura 133 - Posizionamento carotaggio CAR_04 – interno transetto destro

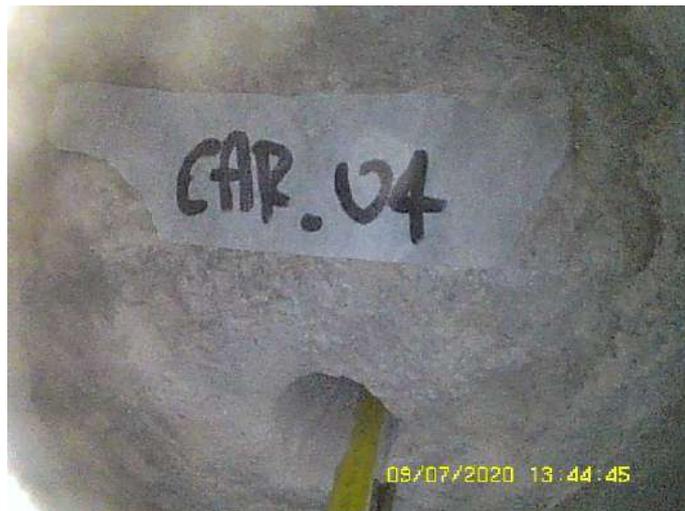


Figura 134 - Foto del carotaggio CAR_03 dall'esterno

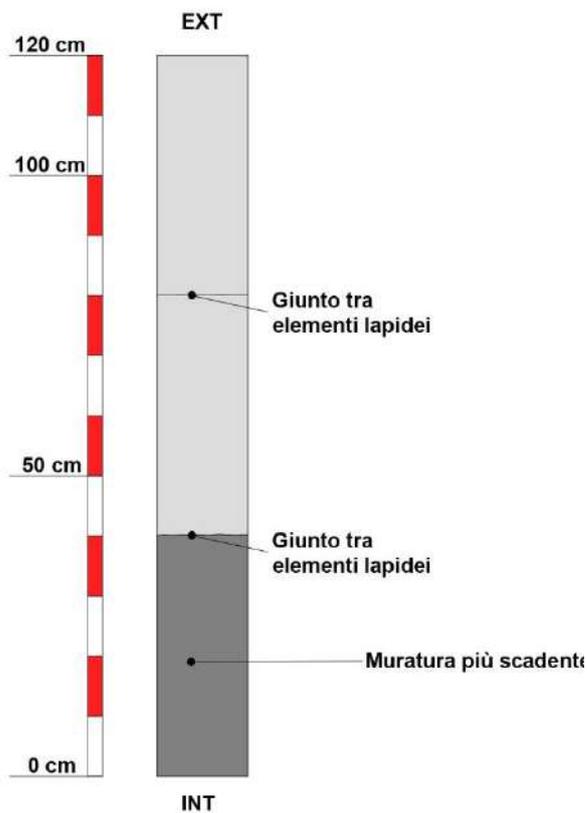


Figura 135 - Schema risultato carotaggio 4



Figura 136 – Foto a 80 cm (40 cm di profondità)



Figura 137 - Foto a 40 cm (80 cm di profondità)

5.3.2 Abside

In zona absidale sono stati eseguiti due carotaggi, di seguito chiamati CAR_02 e CAR_03.

Il carotaggio 2 (CAR_02) è stato effettuato nella zona dell'abside, dall'esterno, sul prospetto della Basilica che si affaccia su via Anicia. È posizionato ad un'altezza dalla quota della strada di 3,29 m e dista dallo spigolo destro dell'abside circa 96 cm. La sua posizione corrisponde ad un'indagine georadar, in particolare alla seconda strisciata effettuata sull'abside.

Come evidenziato in Figura 138 nella stessa zona sono stati eseguiti due carotaggi poiché, il CAR_02 (Figura 139) è stato interrotto ad una profondità di 56 cm (Figura 140). Dall'immagine ottenuta dall'endoscopio sul fondo foro (Figura 141) si suppone che questa interruzione sia causata dalla presenza di un elemento metallico, in quanto nelle immagini ottenute con l'endoscopio appare un elemento di colore scuro che non permetteva il proseguimento della perforazione. In corrispondenza di questa interruzione si suppone vi sia una transizione o rimaneggiamento poiché si intravede la presenza di un mattone. Per i primi circa 60 cm, invece, la muratura è riconducibile alla muratura esterna, con una qualità leggermente inferiore rispetto al paramento esterno del transetto.

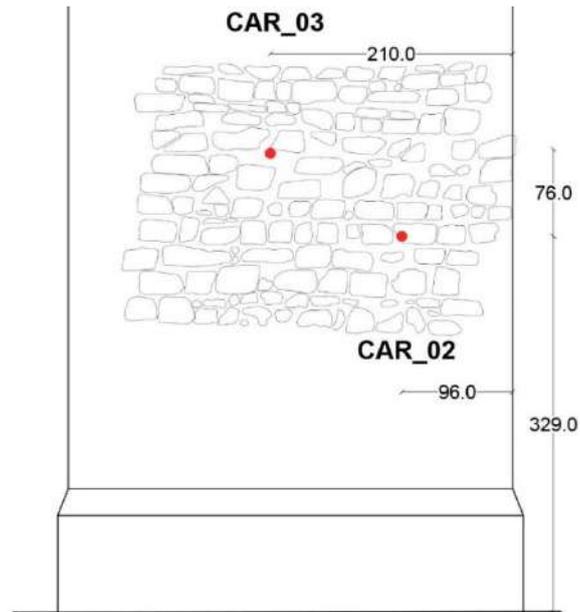


Figura 138 - Posizionamento carotaggio - Abside - Prospetto su Via Anicia



Figura 139 - Foto del carotaggio CAR_02 dall'esterno

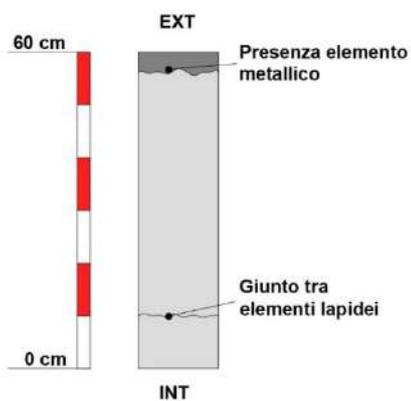


Figura 140 - Schema risultato carotaggio 2



Figura 141 - Foto a 0 cm (56 cm di profondità)

Il carotaggio CAR_03 è stato eseguito nelle vicinanze del CAR_02, con uno spostamento verso l'alto ed a sinistra per evitare che la prova vada nuovamente a rifiuto. Come riportato in Figura 142 questa perforazione ha una differenza di quota con il CAR_02 di 76 cm e dista dallo spigolo destro dell'abside di 2,10 m circa. La posizione di CAR_03 (Figura 143) corrisponde ad un'indagine radar, in particolare alla terza strisciata effettuata sull'abside. Il carotaggio ha raggiunto una profondità di perforazione pari a 120 cm.

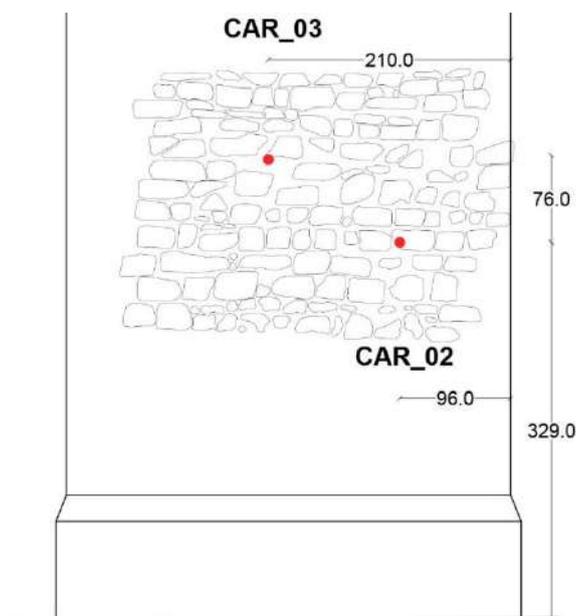


Figura 142 - Posizionamento carotaggio, Abside - Prospetto su Via Anicia



Figura 143 - Foto del carotaggio CAR_03 dall'esterno

L'endoscopia ha permesso la ricostruzione della stratigrafia riportata in Figura 144 dove si può notare come la muratura per circa i primi 30 cm dall'esterno corrisponda con il paramento che risulta visibile in prospetto. Proseguendo verso l'interno si può vedere un blocco unico, ben compatto (Figura 145), per i successivi 20 cm, arrivando quindi ad una distanza di circa 70 cm

dall'interno del foro. A questa quota si nota la rottura del blocco in questione, che sembra essere meno compatto fino alla quota di 50 cm da interno foro. Per i rimanenti 50 cm si vede che la muratura appare decisamente diversa, caratterizzata dalla presenza di numerosi vuoti (Figura 146).

Anche in questo caso, come evidenziato per il primo carotaggio sul transetto, si osserva la presenza di due diversi paramenti tra interno ed esterno della Basilica. Questi, come nel primo caso, confermano quanto rilevato dai documenti storici relativamente ad interventi successivi di inspessimento come rinforzo delle murature.

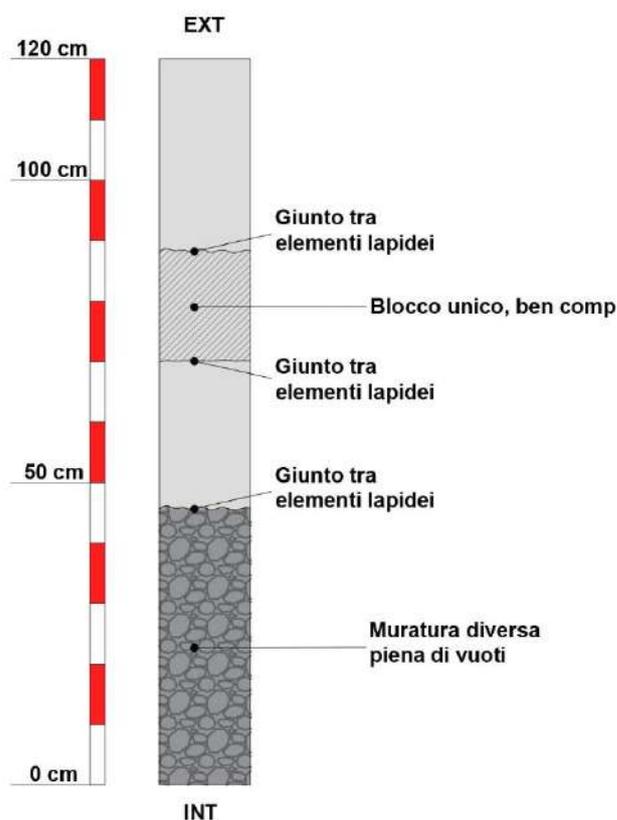


Figura 144 - Schema risultato carotaggio 3



Figura 145 - Foto a 80 cm (40 cm di profondità)



Figura 146 - Foto a 40 cm (80 cm di profondità)

5.4 GEORADAR

Le indagini georadar hanno interessato buona parte dei prospetti esterni della Basilica di San Benedetto (Figura 147), essendo un'indagine non invasiva e di facile realizzazione. Mediante degli appositi ponteggi, si è riusciti ad indagare buona parte della facciata nella zona sopra il rosone, in quanto si suppone da documentazioni storiche che questa porzione di facciata sia stata ricostruita in forme più slanciate con gli interventi del 1800. Si vuole dunque operare una distinzione tra le murature della parte inferiore, risalenti alla più antica Basilica, e quelle del timpano, di più recente realizzazione. Si è proseguito con indagini sulla muratura del transetto destro, per poi proseguire con delle indagini sia dall'esterno che dall'interno dell'abside. Lo scopo in questi casi era quello di caratterizzare la muratura e poterne individuare la stratigrafia muraria e la sua compattezza. Infine, si è conclusa l'indagine georadar con lo svolgimento di un paio di indagini a pavimento in modo da potere localizzare l'eventuale presenza di vuoti o eventuali anomalie nella pavimentazione, probabilmente derivanti dalle continue modifiche che si sono susseguite nel tempo e riguardanti l'accesso alla cripta sotterranea.

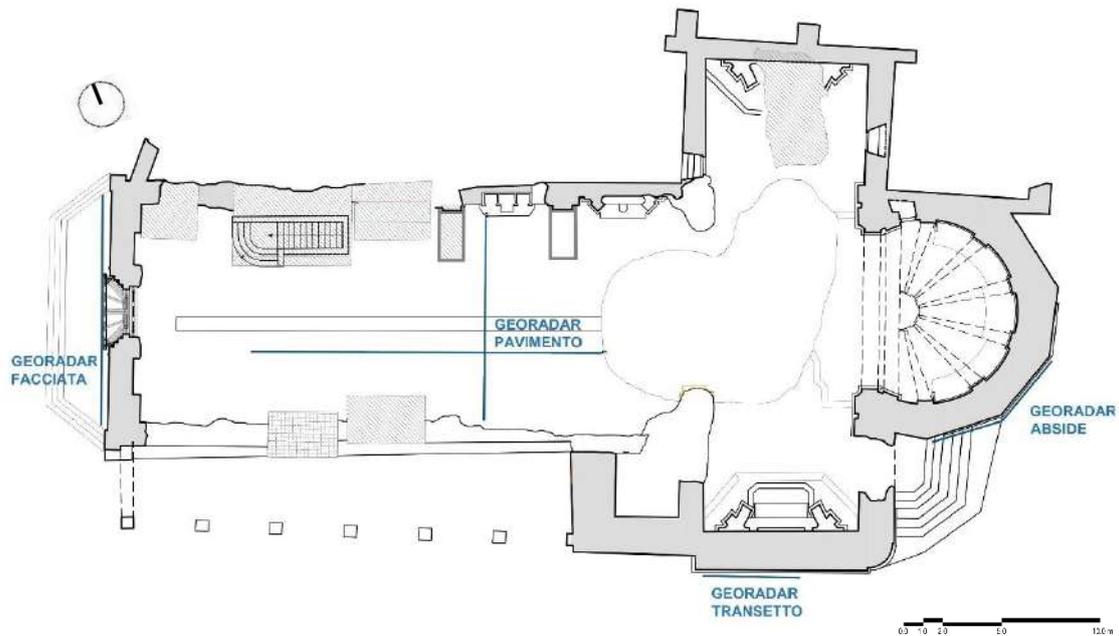


Figura 147 - Localizzazione in pianta delle zone georadar investigate nella Basilica di San Benedetto

In Appendice D, in particolare nelle tavole da T11 a T17, sono presenti tutte le acquisizioni georadar effettuate, individuandone la posizione nei vari prospetti indagati della Basilica. Nelle tavole T18 e T19, invece, si possono individuare tutti i risultati delle acquisizioni georadar, di cui parleremo in modo riassuntivo nei seguenti paragrafi.

5.4.1 Facciata

La facciata della Basilica di San Benedetto è stata oggetto di un'estesa campagna di acquisizioni in tutta la parte soprastante la cornice. In particolare, sono state effettuate acquisizioni georadar relative a diverse zone in corrispondenza del timpano e a livello del rosone. Ciascuna di queste è identificata in Figura 148 con un colore diverso a seconda della zona che si è indagata.

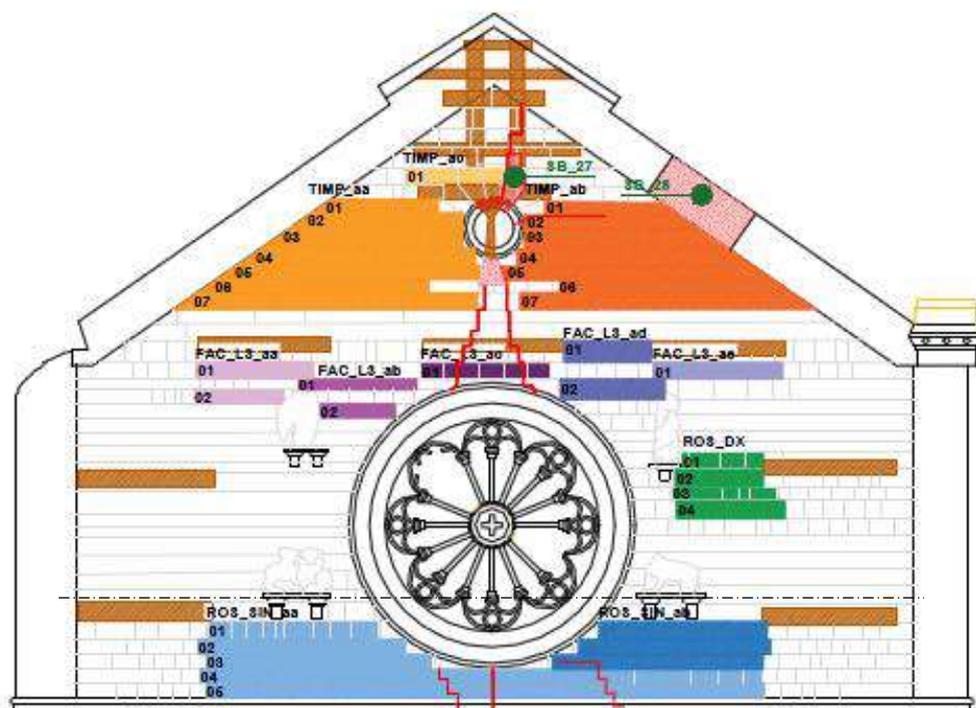


Figura 148 - Vista delle zone di ispezione con georadar nella porzione di facciata interessata

Le acquisizioni georadar in facciata hanno mostrato punti di maggiore qualità sotto al rosone ed in corrispondenza della copertura (Figura 149 e Figura 150), mentre si possono considerare verosimilmente appartenenti a due periodi storici diversi le murature presenti al di sopra del rosone rispetto a quelle a fianco e sotto lo stesso. Questa osservazione trova riscontro nell'analisi delle fasi storiche della Basilica che testimoniano un rialzo della facciata a seguito degli eventi sismici ottocenteschi.

Inoltre, in relazione al profilo acquisito sotto il rosone (Figura 151), il confronto con le immagini radar acquisite nelle diverse parti della facciata, porterebbe ad ipotizzare la presenza di una struttura muraria più integra sotto il rosone. Questa porzione centrale è riconducibile, probabilmente, a ragioni costruttive che hanno tenuto conto di un punto di debolezza della facciata proprio nella zona compresa tra rosone e portale.

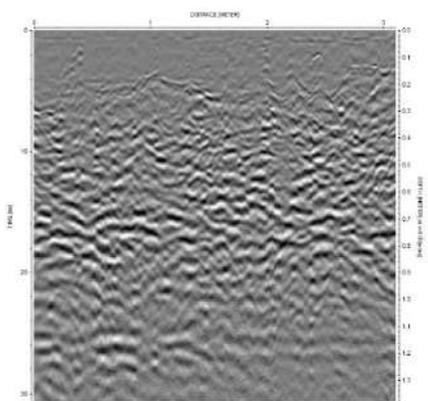


Figura 149 - Timp_aa_04

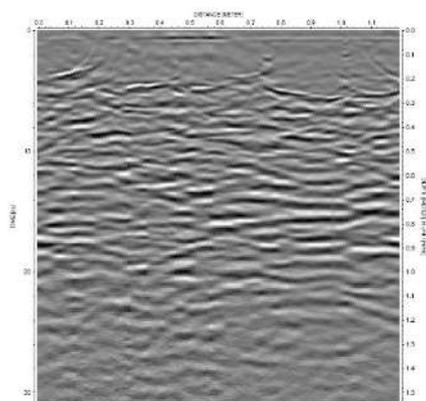


Figura 150 - Ros_Dx_02

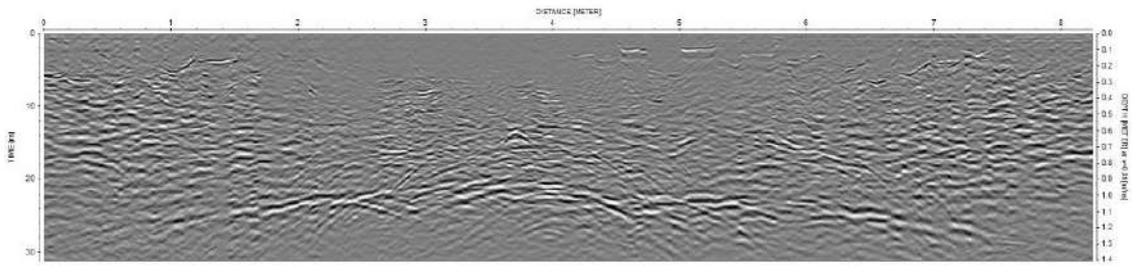


Figura 151 - ROS_SIN_aa_04

Si riporta in Figura 152 un esempio corrispondente ad un'acquisizione georadar effettuata nel timpano: si evidenzia una zona superficiale senza attenuazione, verosimilmente relativa ad un materiale più compatto per i primi 20-30 cm. Circa dopo 1 m, invece, si può osservare un accentuato fenomeno di riflessione, che va ad individuare lo spessore della parete in esame. È stato, inoltre, eseguito un confronto tra il disegno dell'apparecchiatura muraria, ricavato mediante ortofoto, e il radargramma e si è osservata una quasi perfetta corrispondenza con i giunti tra gli elementi lapidei. In particolare, alla progressiva metrica 0.8 m è evidente una chiara diffrazione nel radargramma provocata dalla presenza d'aria tra i blocchi, che testimonia la loro posa a secco. La linea gialla tratteggiata evidenzia la riflessione che consente di determinare lo spessore totale del muro, e di validare la calibrazione delle velocità di trasmissione adottate nel processing del dato.

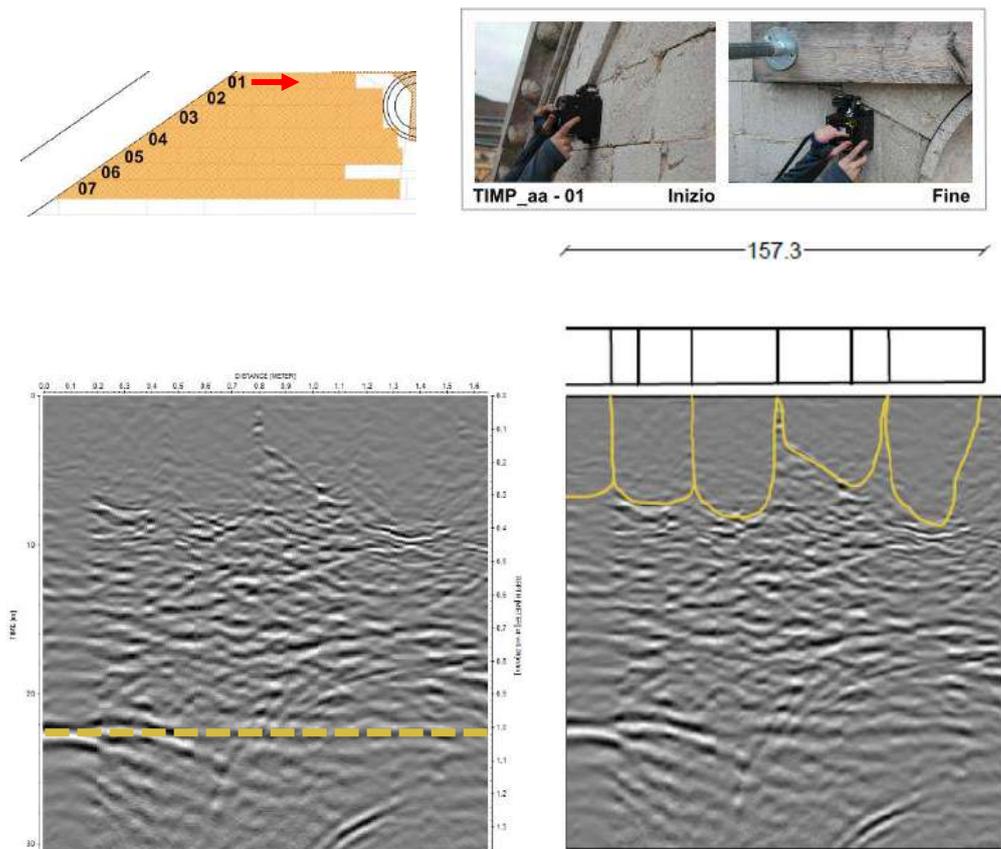


Figura 152 - Risultati acquisizione georadar timpano

5.4.2 Transetto

Le acquisizioni georadar effettuate nella parete esterna del transetto (Figura 153) rendono conto di una struttura muraria il cui comportamento risulta diverso rispetto a quello riscontrato nella facciata della Basilica.

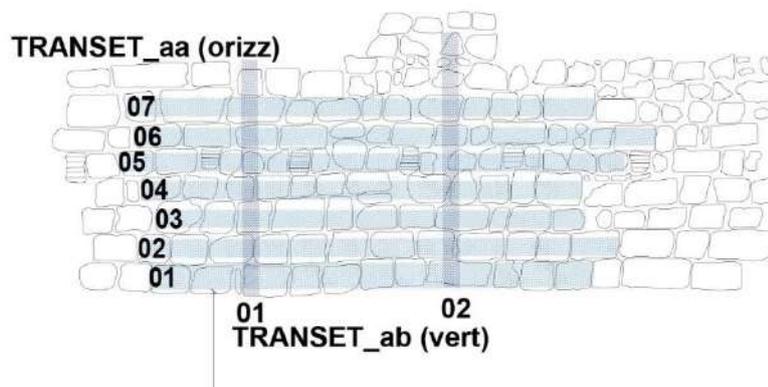


Figura 153 - Schema di ispezione con georadar nel transetto

In particolare, si nota chiaramente una differenza tra le prime due sezioni acquisite nella parte bassa della muratura (Figura 154), dove si registra una marcata attenuazione del segnale e le restanti sezioni più alte, caratterizzate invece da una marcata diffrazione, testimonianza di una forte alterazione nella struttura interna della muratura.

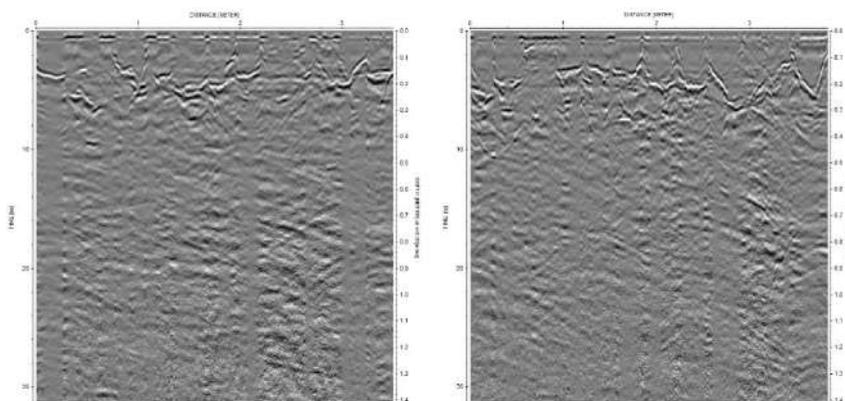


Figura 154 - TRASET_aa_01 (sinistra) e TRASET_aa_02 (destra)

Risultano anche in questo settore, come nella facciata, ben visibili le transizioni tra paramento esterno e nucleo interno della muratura. Si precisa che dato lo spessore murario in questa zona, la massima penetrazione del segnale radar con l'antenna utilizzata non ha consentito di rilevare l'intero spessore della muratura, sebbene la condizione qui descritta si possa ritenere rappresentativa dell'intero paramento in tutto il suo spessore. Si riporta di seguito, in Figura 155, l'immagine *radargramma* dove sono segnati, in quanto chiaramente visibili grazie alla riflessione del segnale, le transizioni tra i paramenti presenti all'interno dello spessore murario. Questa acquisizione è stata messa a confronto con i risultati emersi a seguito del carotaggio CAR_01 effettuato sempre sul transetto e si è potuto osservare come le transizioni tra i giunti sono circa corrispondenti in termini numerici a quanto emerso mediante indagine con video-endoscopia a

seguito di carotaggio. Si può osservare, infatti, una prima porzione di muratura più compatta per i primi 20 cm ed è visibile un ulteriore giunto tra gli elementi lapidei dopo circa 50 cm.

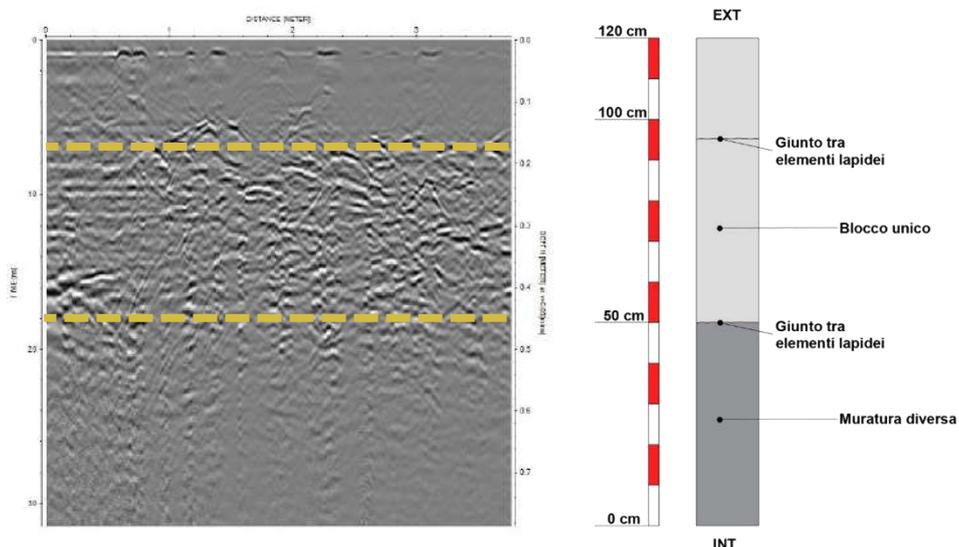


Figura 155 - TRANSET_aa_05 e confronto con stratigrafia muraria emersa a seguito di carotaggio e video-endoscopia

Anche in questo caso è opportuno fare un confronto tra le acquisizioni georadar e l'apparecchiatura muraria. Viene riportato come esempio l'indagine georadar che è stata eseguita in corrispondenza delle buche pontai. Si può osservare in Figura 156 un'esatta corrispondenza tra il disegno dell'apparecchiatura muraria che è stato ricavato mediante ortofoto e i risultati dell'indagine georadar eseguita, in cui si possono osservare i vuoti lasciati dai giunti di malta e, soprattutto, fenomeni di riflessione dovuti alla presenza dei vuoti in corrispondenza delle buche pontai.

Nella stessa immagine, la linea bianca tratteggiata sul radargramma identifica la transizione tra potenziali differenti tipi di paramenti all'interno della muratura.

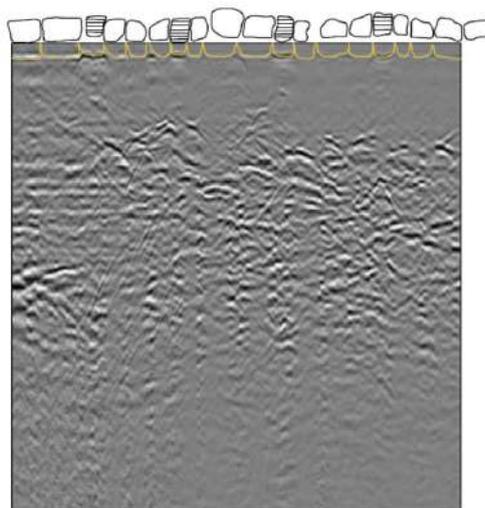


Figura 156 - Indagine georadar eseguita in corrispondenza delle buche pontai sul transetto (TRANSET_aa_05)

5.4.3 Abside

Le indagini condotte nell'abside hanno riguardato sia la parte esterna che quella interna (Figura 157). Le acquisizioni interne sono state fatte in corrispondenza con quelle esterne, cercando di ottenere una continuità nell'indagine della muratura. In *situ*, infatti, si è valutata la posizione in cui realizzare le indagini tenendo conto della differenza di quota tra il livello del suolo all'esterno e l'interno della Basilica.

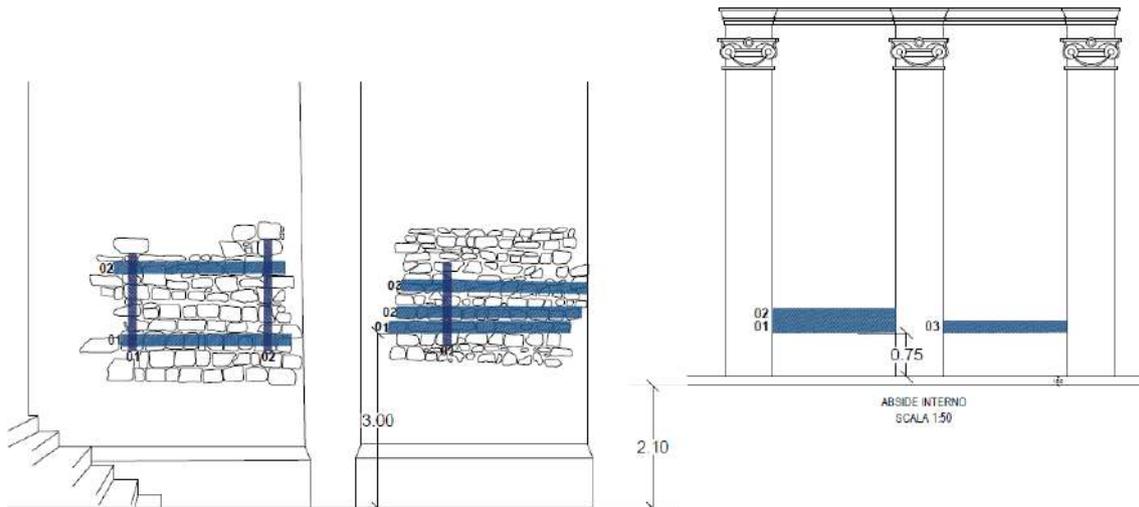


Figura 157 - Vista d'insieme dell'abside esterno (sinistra) e interno (destra) delle zone di ispezione con georadar

Dai radargrammi ottenuti è stato possibile evidenziare la presenza di una struttura muraria composta da due diversi paramenti la cui identificazione è resa possibile da una marcata alterazione del segnale nella parte centrale del nucleo murario. Sebbene il segnale radar non abbia permesso l'attraversamento della parete in tutto il suo spessore, le misure condotte in corrispondenza sia dall'esterno che dall'interno dell'abside consentono, messe insieme, di identificare una discontinuità dovuta verosimilmente ad una interfaccia tra due paramenti diversi (Figura 158), localizzabile circa a metà del reale spessore murario, avvalorando l'ipotesi di una modifica della conformazione absidale in fase settecentesca.

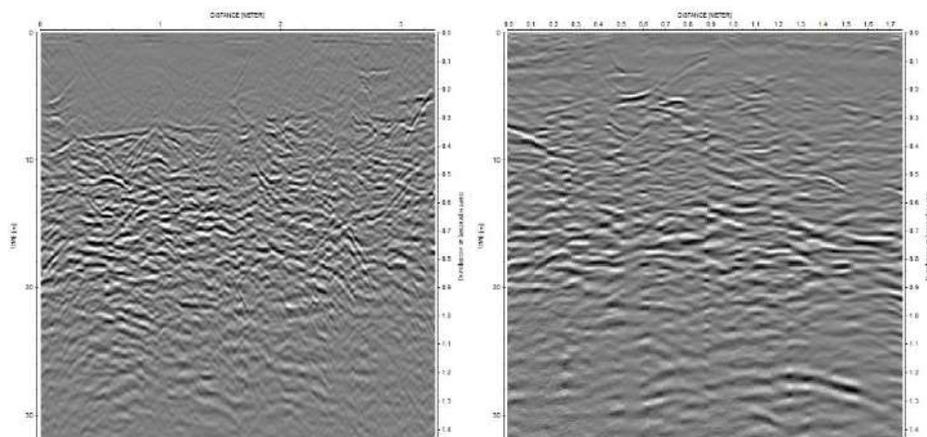


Figura 158 – ABSIDE_aa_01 (sinistra) e ABS_INT_aa_01 (destra)

5.4.4 Pavimento

Sono, infine, state eseguite due acquisizioni georadar a pavimento (Figura 159). Si è scelto, in concomitanza con gli spazi a disposizione in fase di rilievo in *situ* di eseguire una indagine nella direzione trasversale e una nella direzione longitudinale, in modo da potere rappresentare nella quasi totalità le caratteristiche della pavimentazione.

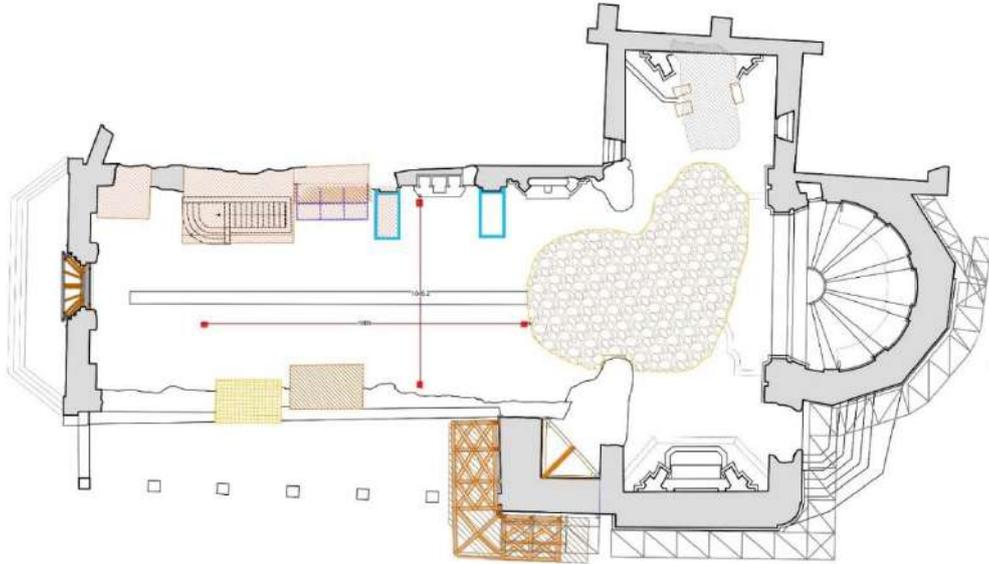


Figura 159 - Vista d'insieme della pianta e delle zone di ispezione con georadar a pavimento

Le due sezioni georadar acquisite identificano la presenza di un rinforzo strutturale sotto pavimentale, per cui si ipotizza la presenza di una rete elettrosaldata con elementi di rinforzo (travi) trasversali alla navata circa ogni 1,2 m. Tale sistema di irrigidimento metallico non consente una chiara lettura delle strutture sottostanti, sebbene siano leggibili rispettivamente alla progressiva 1 m e 9 m nella sezione trasversale e a 1 m circa nella sezione longitudinale alla navata effetti di risonanza in profondità. Questi sono individuabili in Figura 160 ed è possibile correlarli alla presenza di vuoti, forse in parte riempiti, che si può presumere facciano riferimento alle continue modifiche all'accesso alla cripta che si sono verificate nel corso dei secoli (cfr. capitolo 4.7). I due vuoti, dunque, corrisponderebbero alla presenza delle due scale laterali di accesso alla cripta.

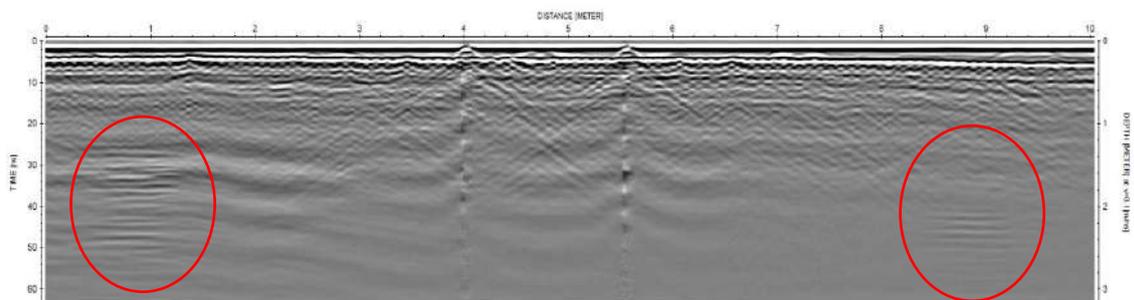


Figura 160 - Sezione trasversale

6. QUALITÀ MURARIA

In questo capitolo si riporta, nel dettaglio, l'analisi di qualità muraria eseguita in punti ritenuti rappresentativi della muratura, così come spiegata al Capitolo 2.4.

All'interno della Basilica di San Benedetto di Norcia sono state individuate sei zone dove si è proceduto con l'analisi della qualità muraria, evidenziate come in Figura 161.

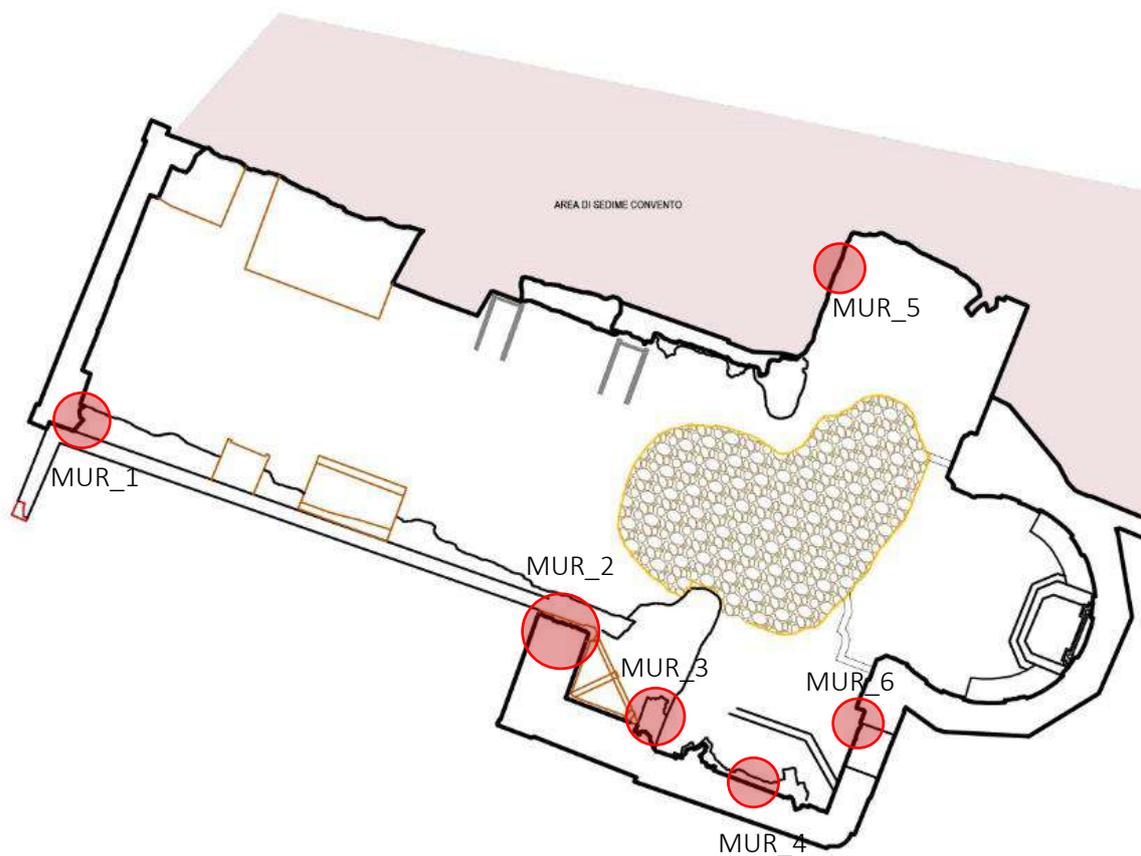


Figura 161 – Individuazione porzioni murarie per l'analisi della Qualità Muraria

In alcuni casi non si è potuto, per ovvie ragioni, procedere con l'analisi di qualità muraria in sezione (QM4, QM5 e QM6) e dunque si è proceduto con la sola valutazione in prospetto.

Vengono di seguito riportati in breve i risultati dei valori di qualità muraria delle singole pareti, le cui caratteristiche sono ampiamente descritte mediante la compilazione delle “*Schede di 1° livello per il rilievo della tipologia e della qualità della muratura*”, presenti per ogni muratura in esame in Appendice B.

6.1 NAVATA

La prima muratura analizzata (MUR_1) fa riferimento alla parete della navata laterale destra, lato Portico delle Misure. La muratura in questione non è stata considerata ad una quota troppo elevata e si riferisce, probabilmente, al rifacimento settecentesco della Basilica. La parete è attualmente interamente crollata, per questo motivo la sezione è ben visibile. Per il prospetto è stato considerata la situazione pre-sisma. Prospetto e sezione sono visibili rispettivamente in Figura 162 e in Figura 163.

Si tratta, dunque, di una muratura esterna, in pietra, costituita da tre paramenti: i due esterni di spessore 12 cm e il paramento interno di circa 76 cm che portano la muratura ad avere uno spessore di circa 100 cm totali.

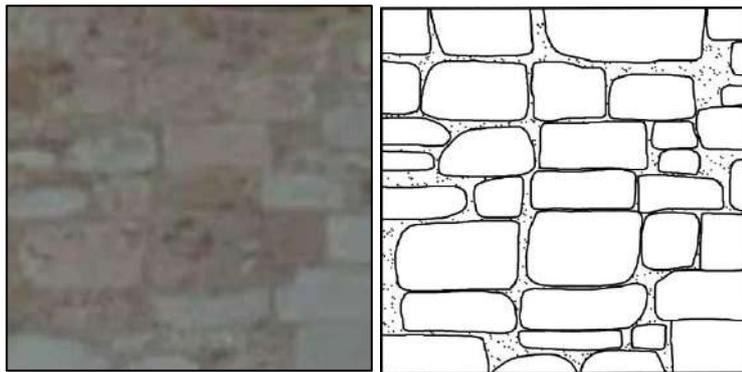


Figura 162 – Prospetto QM1

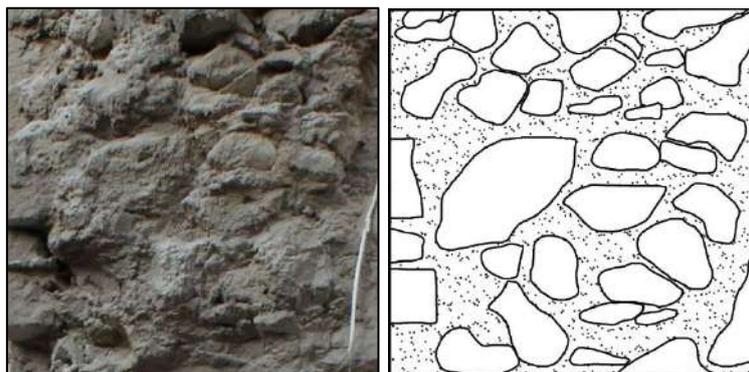


Figura 163 – Sezione QM1

A seguito dell’analisi del rispetto o non di tutti i parametri della regola dell’arte, come descritti al § 2.4.1, per quanto riguarda i parametri osservabili in prospetto, si può vedere un parziale rispetto sia del parametro relativo all’orizzontalità dei filari che quello relativo allo sfalsamento dei giunti verticali (Figura 164). Risultano assenti elementi riferibili a listature o zeppe e forma e dimensione degli elementi sono riconducibili ad un parziale rispetto del parametro di riferimento.

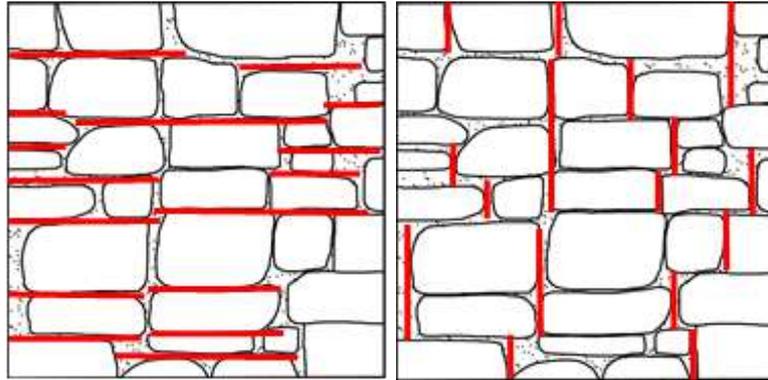


Figura 164 - Orizzontalità dei filari e sfalsamento giunti verticali QM1

La valutazione della LMT in sezione (Figura 165), di lunghezza 115 cm circa, conferma l'assenza di diatoni, rendendo non rispettato il parametro della regola dell'arte ad esso corrispondente.

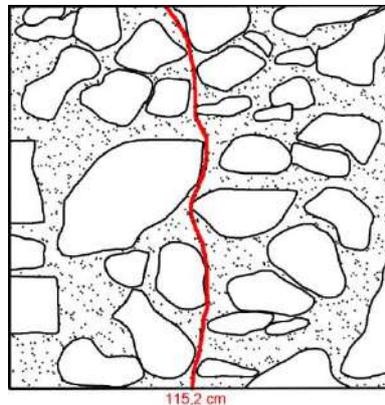


Figura 165 - LMT Sezione QM1

Le valutazioni relative a questi parametri, uniti alla presenza di una malta che dall'analisi in laboratorio si è vista presentare una moderata coesione, portano la muratura ad avere un punteggio IQM come segue:

$$IQM_V = 2,45$$

$$IQM_{NP} = 2,10$$

$$IQM_{FP} = 2,10$$

La muratura in questione risulta essere in "classe C" per tutte tre le tipologie di azioni spiegate in precedenza.

Si è proceduto con la valutazione del valore della LMT in prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, che risulta essere di 113,2 cm (Figura 166). La muratura, dunque, risulta essere una muratura di livello inferiore, M1 e presenta dunque un cattivo ingranamento nel piano della parete.

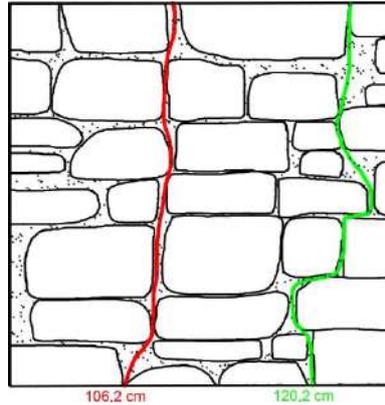


Figura 166 - LMT Prospetto QM1

Le valutazioni successive riguardanti questa muratura sono mirate ad ottenere una correlazione tra i valori di IQM trovati e i parametri meccanici della muratura, così come spiegato al § 2.4.3. Tenendo di riferimento i valori medi dei parametri meccanici, si ottengono dalla correlazione con IQM_v e IQM_{NP} i valori schematizzati in Tabella 8.

Tabella 8 - Correlazione IQM con i parametri meccanici della muratura

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v_0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		2,2	0,039	0,090	1069

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019 [Circolare 2019], si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura a conci sbozzati con paramento di spessore disomogeneo*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati in Tabella 9.

Tabella 9 - Parametri meccanici muratura secondo Circolare 2019

Muratura a conci sbozzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v_0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2,0	0,035	0	1020	340	20
	max	3,0	0,051	0	1440	480	20
	medio	2,5	0,043	0	1230	410	20

6.2 CAMPANILE

La seconda valutazione della qualità muraria (MUR_2) è stata eseguita nel muro del campanile lato Portico delle Misure (Figura 167). Si tratta di una muratura d'ambito di spessore di circa 2,36 m, quindi un blocco molto massiccio che presenta due paramenti esterni di spessore limitato rispetto al nucleo interno costituito in prevalenza da malta, come si può notare dall'immagine in sezione in Figura 168.

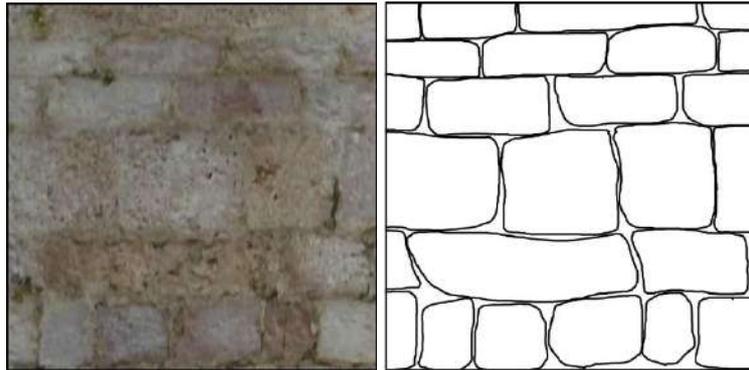


Figura 167 - Prospetto QM2

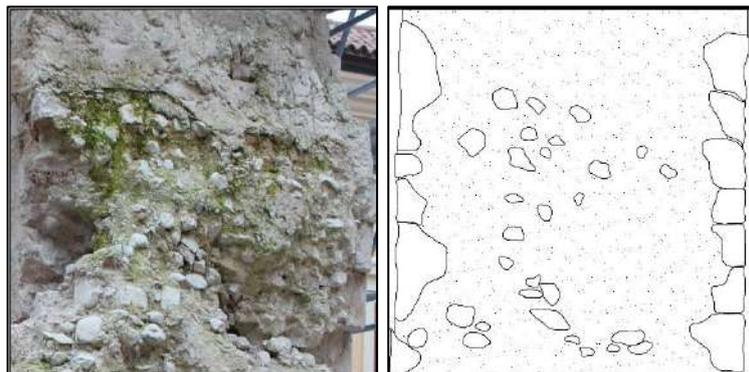


Figura 168 - Sezione QM2

Si è proceduto con l'analisi dei sette parametri della regola dell'arte. Di seguito si riportano gli esempi riferiti al parametro dell'orizzontalità dei filari, che risulta essere rispettato, e il parametro dello sfalsamento dei giunti verticali, che è stato definito parzialmente rispettato (Figura 169). Come visibile chiaramente dalla sezione non sono presenti diatoni o vuoti all'interno della muratura. Risulta noto, però, che la malta in questa porzione di campanile, presenta una coesione molto alta, assimilabile quindi ad una malta di buona qualità.

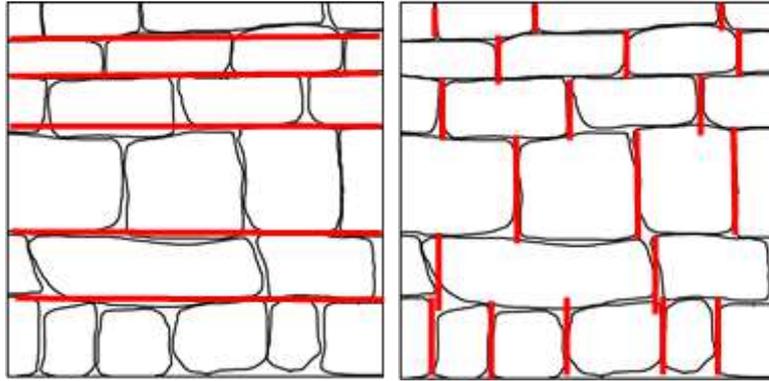


Figura 169 - Orizzontalità dei filari e sfalsamento giunti verticali QM2

L'analisi dei sopracitati parametri della regola dell'arte porta alla valutazione dei seguenti indici di qualità muraria:

$$IQM_V = 4,55$$

$$IQM_{NP} = 3,50$$

$$IQM_{FP} = 3,85$$

Con questi valori la muratura risulta essere in "classe C" solo per azioni che avvengono nel piano della muratura, mentre risulta in "classe B" per azioni verticali e azioni che agiscono fuori piano.

Per quanto riguarda l'analisi dell'ingranamento nel piano delle pareti mediante la valutazione della LMT (Figura 170), la muratura risulta essere una muratura media-superiore, di livello 4 (M4), quindi una muratura efficiente e ben costruita.

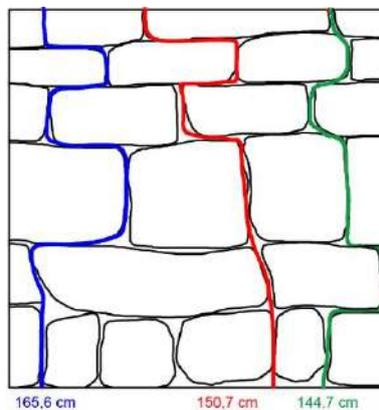


Figura 170 - LMT Prospetto QM2

Il confronto tra i valori di IQM e i parametri meccanici della muratura così come individuati nella Circolare 2019 porta la muratura ad essere individuata come una *muratura a conci sbozzati con paramento di spessore disomogeneo*, come nel caso precedente. In Tabella 10 si riportano i valori calcolati mediante correlazione con IQM.

Tabella 10 - Correlazione IQM con parametri meccanici della muratura

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio	2,0	0,028	0,050	959	289

Anche la terza muratura in esame (MUR_3) è stata scelta nel campanile, in riferimento alla parete non ammassata, inserita presumibilmente a seguito degli interventi settecenteschi di rifacimento del campanile (Figura 171), conseguentemente ad un ampliamento del sedime del campanile. Si tratta, dunque, di una muratura interna, in pietra, costituita da tre paramenti (Figura 172): i due esterni di spessore 12 cm e il paramento interno di circa 40 cm che portano la muratura ad avere uno spessore di circa 64 cm totali.

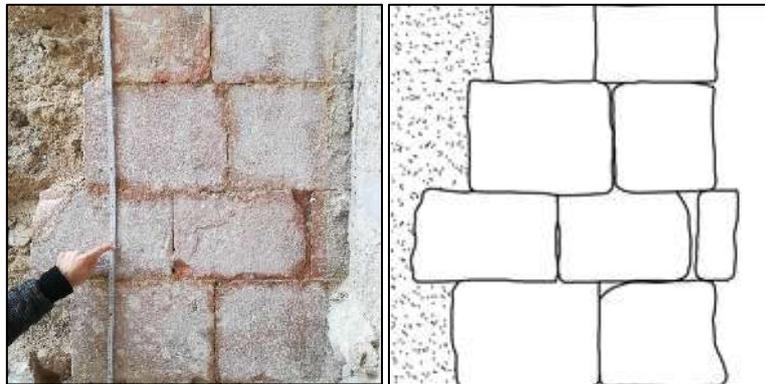


Figura 171 - Prospetto QM3

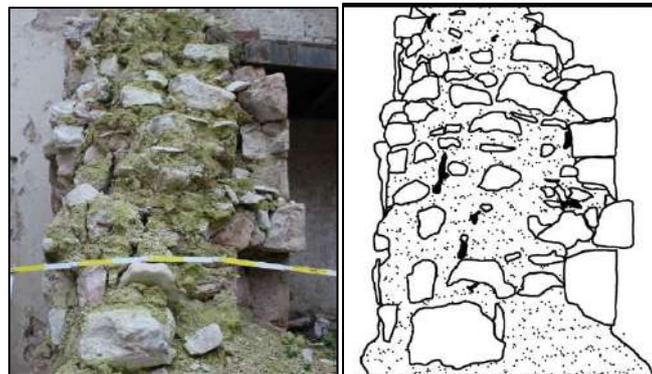


Figura 172 - Sezione QM3

A seguito dell'analisi del rispetto o non di tutti i parametri della regola dell'arte, la muratura presenta, ad esempio, il rispetto del parametro relativo all'orizzontalità dei filari; il parametro relativo allo sfalsamento dei giunti verticali è parzialmente rispettato e risultano assenti elementi riferibili a listature o zeppe (Figura 173).

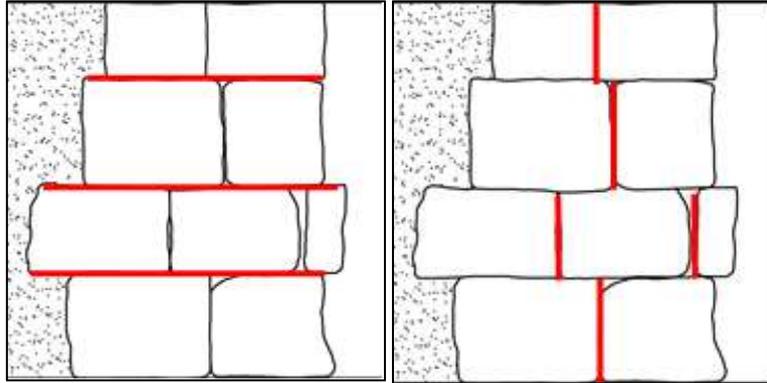


Figura 173 - Orizzontalità dei filari e sfalsamento giunti verticali QM3

In sezione, invece, si evidenzia tramite LMT la conferma dell'assenza di diatoni, rendendo non rispettato il parametro della regola dell'arte ad esso corrispondente (Figura 174).

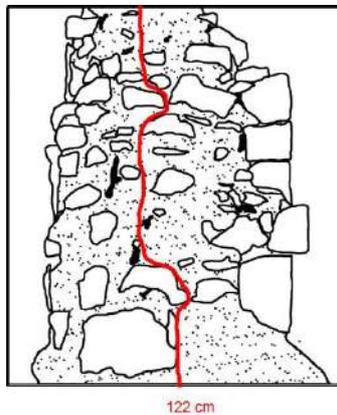


Figura 174 - LMT Sezione QM3

Tutte queste valutazioni, insieme alla presenza di una malta, che dall'analisi in laboratorio è risultata essere di buona qualità, portano la muratura ad avere un punteggio IMQ come segue:

$$IQM_V = 3,50$$

$$IQM_{NP} = 3,15$$

$$IQM_{FP} = 3,15$$

La muratura in questione risulta quindi essere in "classe B" per azioni verticali e azioni che investono la parete fuori piano, in "classe C" per azioni che agiscono nel piano.

Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 130 cm (Figura 175). Non è presente, quindi, un elevato ingranamento nel piano delle pareti. La muratura risulta essere di livello medio-inferiore, M2.

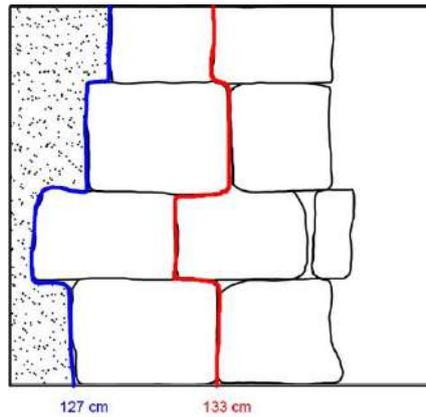


Figura 175 - LMT Prospetto QM3

Si è dunque proceduto eseguendo la correlazione tra i valori di IQM appena trovati e i parametri meccanici della muratura ad essa attribuiti, trovando riscontro con una *muratura a conci sbazzati*, come individuato da Circolare 2019. Tenendo di riferimento i valori medi dei parametri meccanici, infatti, si ottengono dalla correlazione con IQM_V e IQM_{NP} valori riportati in Tabella 11.

Tabella 11 - Correlazione IQM con i parametri meccanici della muratura

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		2,0	0,028	0,050	959

6.3 TRANSETTO

Le ultime tre murature analizzate sono state scelte in corrispondenza del transetto. MUR_4 e MUR_6 si trovano nel transetto destro, MUR_5 nel transetto sinistro. Tutte tre le murature non hanno permesso un'analisi in sezione, in quanto non visibile.

Nel caso di MUR_4 si fa riferimento al prospetto della porzione di muratura posta nel retro dell'altare laterale presente nel transetto destro (Figura 176).

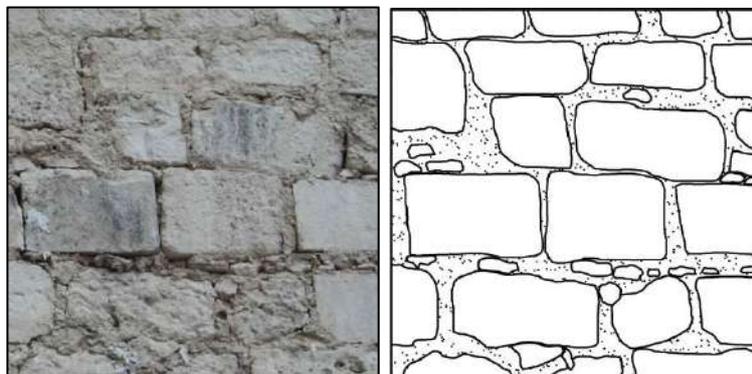


Figura 176 - Prospetto QM4

Anche in questo caso si nota un parziale rispetto dei parametri riferiti all'orizzontalità dei filari e allo sfalsamento dei giunti verticali, come evidenziato in Figura 177. Parzialmente rispettati risultano anche i parametri relativi alla forma e dimensione degli elementi resistenti. Non essendo visibile la sezione, i parametri relativi ad essa, come ad esempio la presenza di diatoni, sono stati considerati non rispettati, in modo da considerare il parametro come più peggiorativo possibile.

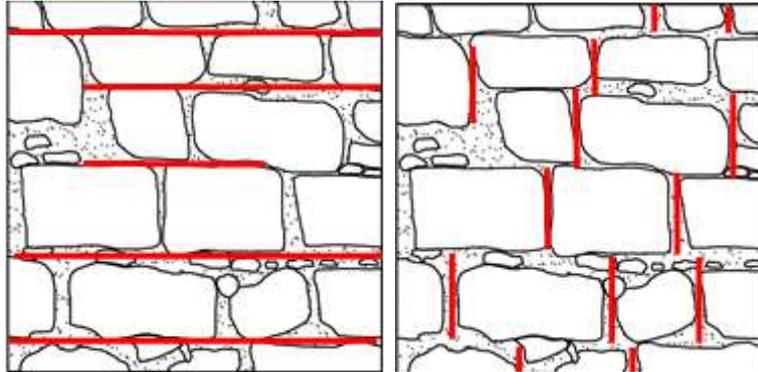


Figura 177 - Orizzontalità dei filari e sfalsamento giunti verticali QM4

I tre valori dell'indice di qualità muraria risultanti sono:

$$IQM_V = 2,45$$

$$IQM_{NP} = 2,10$$

$$IQM_{FP} = 2,10$$

La muratura, dunque, risulta rientrare in "classe C" per tutte le tre tipologie di azioni prese in considerazione.

La valutazione della LMT in prospettiva (Figura 178) classifica la muratura come una muratura di livello intermedio, M3, di media efficienza e qualità costruttiva.

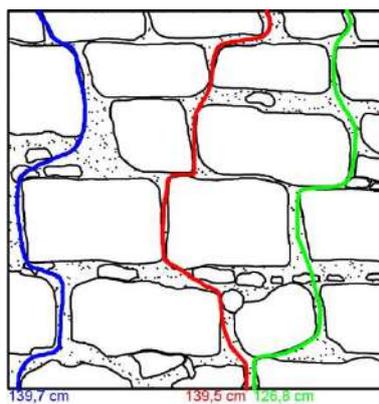


Figura 178 - LMT Prospetto QM4

Anche in questo caso la correlazione tra i valori di IQM e i parametri meccanici della muratura corrispondono alla scelta di una *muratura a conci sbazzati con paramento di spessore disomogeneo*. In Tabella 12 sono riportati i valori di calcolo.

Tabella 12 - Correlazione IQM con i parametri meccanici della muratura

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio	2,2	0,039	0,09	1068,9	336,3

La quinta muratura in analisi (MUR_5) è individuata, invece, nella parete ovest del transetto sinistro (Figura 179 e Figura 180).

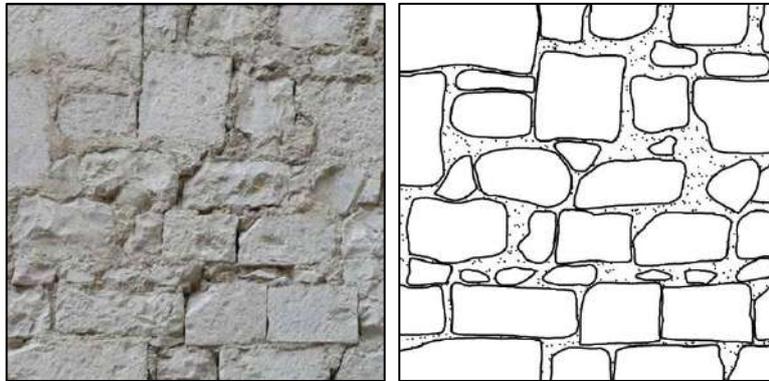


Figura 179 - Prospetto QM5

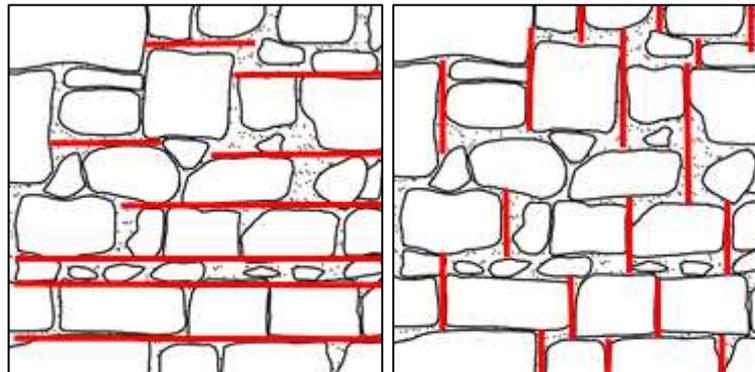


Figura 180 - Orizzontalità dei filari e sfalsamento giunti verticali QM5

La muratura sembra essere del tutto assimilabile a QM4, quindi alla muratura considerata per l'analisi di qualità muraria nel transetto destro, trovando infatti gli stessi valori di IQM:

$$IQM_V = 2,45$$

$$IQM_{NP} = 2,10$$

$$IQM_{FP} = 2,10$$

Di conseguenza la correlazione tra i valori di IQM e i parametri meccanici della muratura è del tutto assimilabile a QM4 presa in considerazione precedentemente e ci si riferisce, dunque, ad una *muratura a conci sbazzati con paramento di spessore disomogeneo*.

La valutazione della LMT in prospetto (Figura 181) si discosta leggermente con la precedente muratura in quanto, in questo caso, abbiamo una muratura di livello medio-inferiore, M2, con una lunghezza media delle LMT pari a 123,66 cm.

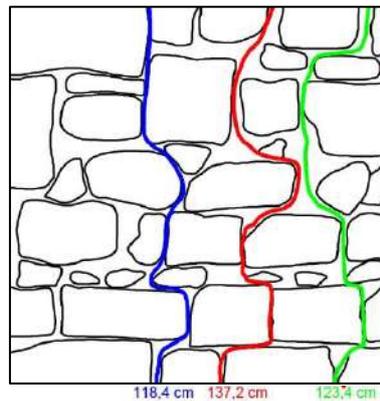


Figura 181 - LMT Prospetto QM5

L'ultima analisi di qualità muraria effettuata (MUR_6) è stata svolta in una zona della Basilica che già ad occhio nudo può essere supposta di scarsa qualità muraria. La localizzazione del prospetto della muratura in analisi (Figura 182) è anche in questo caso nel transetto destro, ma nella parte alta della parete adiacente all'abside, laddove sono presenti i crolli della copertura, quindi della volta a botte che caratterizzava il transetto.

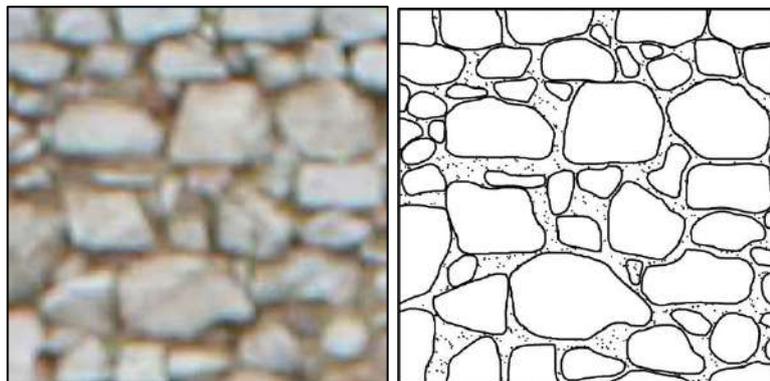


Figura 182 - Prospetto QM6

I parametri della regola dell'arte sono tutti non rispettati (Figura 183), eccetto la qualità della malta, che comunque si assume come coesa e quindi il parametro ad essa relativo è stato supposto come parzialmente rispettato, così come il parametro relativo alla resistenza degli elementi.

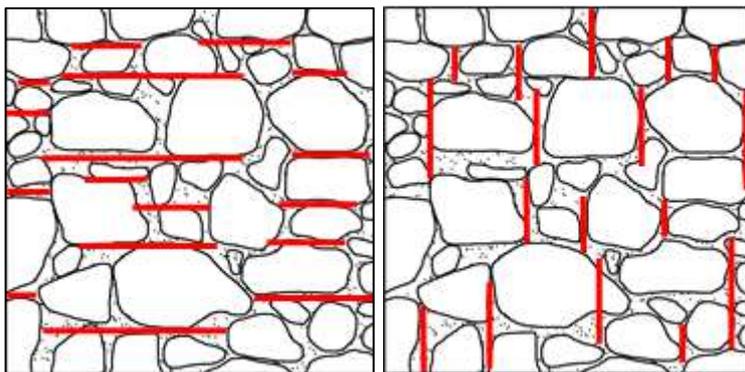


Figura 183 - Orizzontalità dei filari e sfalsamento giunti verticali QM6

Il punteggio IQM che si ottiene è il seguente:

$$IQM_V = 0,35$$

$$IQM_{NP} = 0,35$$

$$IQM_{FP} = 0,70$$

indice, dunque, di una muratura molto scarsa, che infatti risulta essere in “classe C”.

L’analisi dell’ingranamento del piano delle pareti mediante la valutazione della LMT in prospetto, che presenta una lunghezza di 116 cm (Figura 184), definisce la muratura come una muratura di livello 2, M2, livello medio-inferiore.

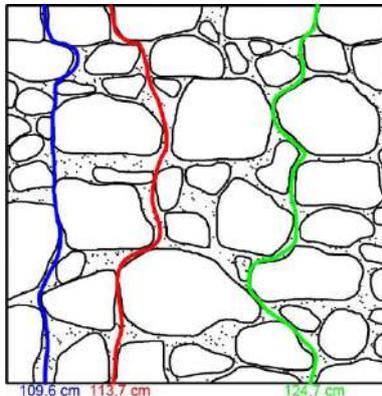


Figura 184 - LMT Prospetto QM6

La correlazione tra IQM e i parametri meccanici della muratura porta alla definizione di una muratura diversa rispetto alle 5 murature analizzate in precedenza, che da Circolare 2019 viene definita come *muratura in pietrame disordinata*. In Tabella 13 e Tabella 14 viene fatto un confronto tra i valori di calcolo e i valori da normativa [Circolare 2019].

Tabella 13 - Correlazione IQM con i parametri meccanici della muratura

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio	1,5	0,025	0,040	866	322

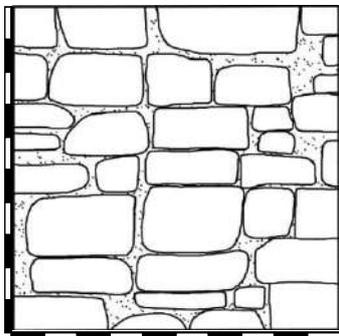
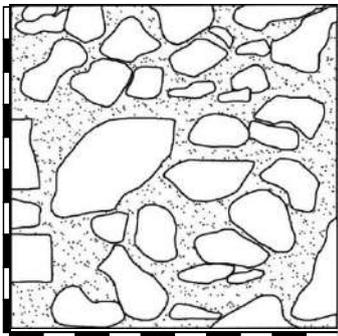
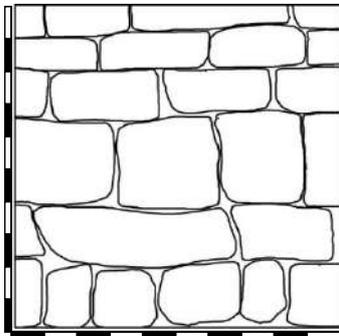
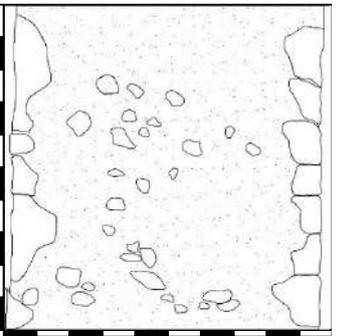
Tabella 14 - Proprietà meccaniche della muratura secondo Circolare 2019

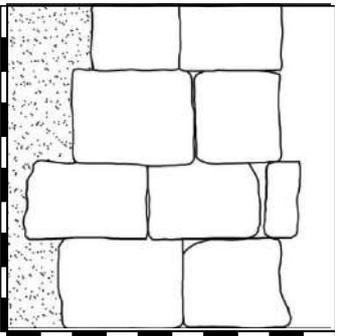
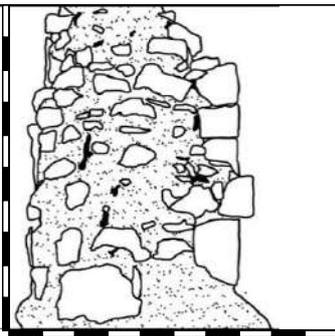
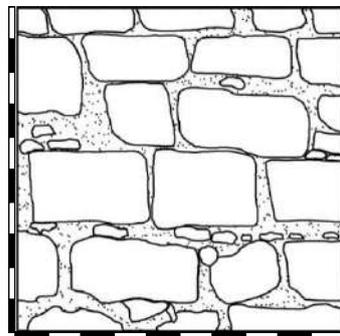
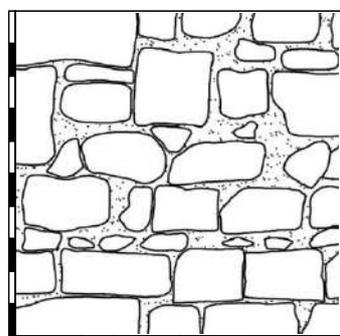
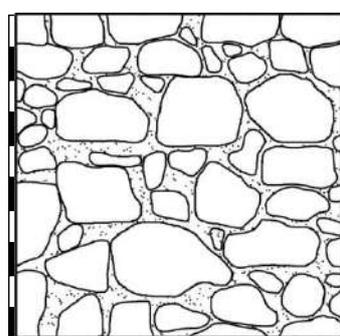
Muratura in pietrame disordinata	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	fv_0 (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	1,0	0,018	0	690	230	19
	max	2,0	0,032	0	1050	350	19
	medio	1,5	0,025	0	870	290	19

6.4 TABELLA RIASSUNTIVA

In Tabella 15 è presente un quadro riassuntivo che evidenzia come, pur essendo le murature circa tutte classificate in classe C, si differenzino notevolmente l'una dall'altra, presentando in taluni casi valori peggiori, come si vede ad esempio per MUR_6 che presenta valori di IQM_V molto bassi, contrapponendosi a MUR_1, MUR_4 e MUR_5 che invece presentano valori di IQM_V al limite tra categoria C e categoria B.

Tabella 15 - Riassunto analisi qualità muraria

PROSPETTO	SEZIONE	INDICE QUALITÀ MURARIA																				
MUR_1																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CATEGORIA MURATURA</th> </tr> <tr> <th>TIPO DI AZIONE</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AZIONE VERTICALE</td> <td>$0 \leq IQM < 2,5$</td> <td>$2,5 \leq IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORTOGONALE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 4$</td> <td>$4 < IQM < 7$</td> <td>$7 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 3$</td> <td>$3 < IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> </tbody> </table> <p> $IQM_V = 2,45$ $IQM_{NP} = 2,10$ $IQM_{FP} = 2,10$ </p> <p> CLASSE C PER TUTTE LE TRE TIPOLOGIE DI AZIONI </p>	CATEGORIA MURATURA				TIPO DI AZIONE	C	B	A	AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
CATEGORIA MURATURA																						
TIPO DI AZIONE	C	B	A																			
AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
MUR_2																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CATEGORIA MURATURA</th> </tr> <tr> <th>TIPO DI AZIONE</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AZIONE VERTICALE</td> <td>$0 \leq IQM < 2,5$</td> <td>$2,5 \leq IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORTOGONALE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 4$</td> <td>$4 < IQM < 7$</td> <td>$7 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 3$</td> <td>$3 < IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> </tbody> </table> <p> $IQM_V = 4,55$ CLASSE B $IQM_{NP} = 3,50$ CLASSE C $IQM_{FP} = 3,85$ CLASSE B </p> <p>* la muratura in oggetto non corrisponde a 1x1x1 m in quanto raggiunge uno spessore di 2,36 m</p>	CATEGORIA MURATURA				TIPO DI AZIONE	C	B	A	AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
CATEGORIA MURATURA																						
TIPO DI AZIONE	C	B	A																			
AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			

MUR_3																						
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CATEGORIA MURATURA</th> </tr> <tr> <th>TIPO DI AZIONE</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AZIONE VERTICALE</td> <td>$0 \leq IQM < 2,5$</td> <td>$2,5 \leq IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORTOGONALE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 4$</td> <td>$4 < IQM < 7$</td> <td>$7 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 3$</td> <td>$3 < IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> </tbody> </table> <p> $IQM_V = 3,50$ CLASSE B $IQM_{NP} = 3,15$ CLASSE C $IQM_{FP} = 3,15$ CLASSE B </p>	CATEGORIA MURATURA				TIPO DI AZIONE	C	B	A	AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
CATEGORIA MURATURA																						
TIPO DI AZIONE	C	B	A																			
AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
MUR_4																						
	<p>SEZIONE NON VISIBILE</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CATEGORIA MURATURA</th> </tr> <tr> <th>TIPO DI AZIONE</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AZIONE VERTICALE</td> <td>$0 \leq IQM < 2,5$</td> <td>$2,5 \leq IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORTOGONALE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 4$</td> <td>$4 < IQM < 7$</td> <td>$7 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 3$</td> <td>$3 < IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> </tbody> </table> <p> $IQM_V = 2,45$ $IQM_{NP} = 2,10$ $IQM_{FP} = 2,10$ </p> <p>CLASSE C PER TUTTE LE TRE TIPOLOGIE DI AZIONI</p>	CATEGORIA MURATURA				TIPO DI AZIONE	C	B	A	AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
CATEGORIA MURATURA																						
TIPO DI AZIONE	C	B	A																			
AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
MUR_5																						
	<p>SEZIONE NON VISIBILE</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CATEGORIA MURATURA</th> </tr> <tr> <th>TIPO DI AZIONE</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AZIONE VERTICALE</td> <td>$0 \leq IQM < 2,5$</td> <td>$2,5 \leq IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORTOGONALE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 4$</td> <td>$4 < IQM < 7$</td> <td>$7 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 3$</td> <td>$3 < IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> </tbody> </table> <p> $IQM_V = 2,45$ $IQM_{NP} = 2,10$ $IQM_{FP} = 2,10$ </p> <p>CLASSE C PER TUTTE LE TRE TIPOLOGIE DI AZIONI</p>	CATEGORIA MURATURA				TIPO DI AZIONE	C	B	A	AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
CATEGORIA MURATURA																						
TIPO DI AZIONE	C	B	A																			
AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
MUR_6																						
	<p>SEZIONE NON VISIBILE</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">CATEGORIA MURATURA</th> </tr> <tr> <th>TIPO DI AZIONE</th> <th>C</th> <th>B</th> <th>A</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AZIONE VERTICALE</td> <td>$0 \leq IQM < 2,5$</td> <td>$2,5 \leq IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORTOGONALE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 4$</td> <td>$4 < IQM < 7$</td> <td>$7 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> <tr> <td>AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE</td> <td>$0 \leq IQM \leq 3$</td> <td>$3 < IQM < 5$</td> <td>$5 \leq IQM \leq 10$</td> </tr> </tbody> </table> <p> $IQM_V = 0,35$ $IQM_{NP} = 0,35$ $IQM_{FP} = 0,70$ </p> <p>CLASSE C PER TUTTE LE TRE TIPOLOGIE DI AZIONI</p>	CATEGORIA MURATURA				TIPO DI AZIONE	C	B	A	AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$	AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
CATEGORIA MURATURA																						
TIPO DI AZIONE	C	B	A																			
AZIONE VERTICALE	$0 \leq IQM < 2,5$	$2,5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORTOGONALE	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$																			
AZIONE ORIZZONTALE COMPLANARE	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$																			

Si può inoltre osservare che mediante correlazione di IQM con i parametri meccanici della muratura, le prime 5 murature analizzate fanno riferimento a quella che al Capitolo 8 della Circolare 2019 viene definita come *muratura a conci sbozzati con paramento di spessore disomogeneo* di cui si riportano i valori in Tabella 16. L'ultima muratura, invece, è assimilabile ad una *muratura in pietrame disordinato* (Tabella 17).

Tabella 16 - Proprietà meccaniche della muratura secondo Circolare 2019, Muratura a conci sbozzati

Muratura a conci sbozzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2,0	0,035	0	1020	340	20
	max	3,0	0,051	0	1440	480	20
	medio	2,5	0,043	0	1230	410	20

Tabella 17 - Proprietà meccaniche della muratura secondo Circolare 2019, Muratura in pietrame disordinata

Muratura in pietrame disordinata	Valori	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	1,0	0,018	0	690	230	19
	max	2,0	0,032	0	1050	350	19
	medio	1,5	0,025	0	870	290	19

7. ANALISI COMPORTAMENTO IN SEGUITO ALLO SCIAME SISMICO DEL 2016

Il 24 agosto 2016 una scossa di magnitudo 6.0 colpisce i comuni di Accumoli (RI) e di Arquata del Tronto (AP). La scossa è stata la prima di quella che verrà poi definita dall'INGV la sequenza sismica Amatrice Norcia- Visso.

A questo primo evento ne sono susseguiti altri due il 26 ottobre, di magnitudo Mw 5.4 e Mw 5.9 ed epicentri a Macerata, Visso, Ussita e Castelsantangelo sul Nera. A seguire la scossa più forte, avvenuta il 30 ottobre tra Norcia e Preci, con una magnitudo Mw 6.5.

Altre quattro scosse sono poi avvenute il 18 gennaio con epicentri tra Montereale, Capitignano e Cagnano Amiterno. La sequenza sismica si è estesa fino al 28 aprile 2017, comprendendo circa 65500 scosse, per la maggior parte di minore entità. Il bilancio è stato di 11000 sfollati, 388 feriti e 303 morti.

7.1 SISMA DEL 24 AGOSTO 2016

Il primo evento sismico che ha colpito la città di Norcia nel 2016, e dunque la Basilica oggetto di studio, è stato registrato il 24 agosto 2016 alle ore 3:36 italiana. Il terremoto ha avuto epicentro in provincia di Rieti, interessando anche diverse province umbre, tra cui Perugia. Il terremoto si presenta con una magnitudo 6.0 Mw della scala Richter [INGV, 2016a].

Il materiale a disposizione per lo studio del danno a seguito di questo evento sismico è stato fornito dall'Università degli Studi di Perugia, che ha condotto un sopralluogo in data 17 settembre 2016 congiuntamente alla *Soprintendenza Archeologia, Belle Arti E Paesaggio dell'Umbria (SABAP Umbria)*, dichiarando inagibile la Chiesa.

La facciata non risulta avere subito danni considerevoli, se non la parziale espulsione di alcuni conci del paramento esterno e fessurazioni diffuse sopra il portone d'ingresso, in corrispondenza della parte inferiore del rosone e dell'oculo, come visibile in Figura 185.



Figura 185 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo in facciata (sinistra) e rilievo fotografico (destra) [Archivio SABAP]

All'interno si notano fessurazioni lievi ma diffuse in tutta la Basilica. Innanzitutto, in controfacciata si notano distacchi nella parte sommitale del timpano. All'interno si notano fessurazioni diffuse al di sopra dei tre archi che sostengono la cantoria e del portale interno della Basilica (Figura 186). Si evidenzia un distacco e il crollo delle parti superiori degli altari destro della navata e sinistro del transetto e il crollo dell'affresco sopra quest'ultimo. Il lato destro della navata è quello che risulta maggiormente danneggiato dal sisma (Figura 187). Nel dettaglio si vedono dei distacchi e delle fessurazioni diffuse nell'arcone trionfale (Figura 188) e nella zona del transetto (Figura 189).

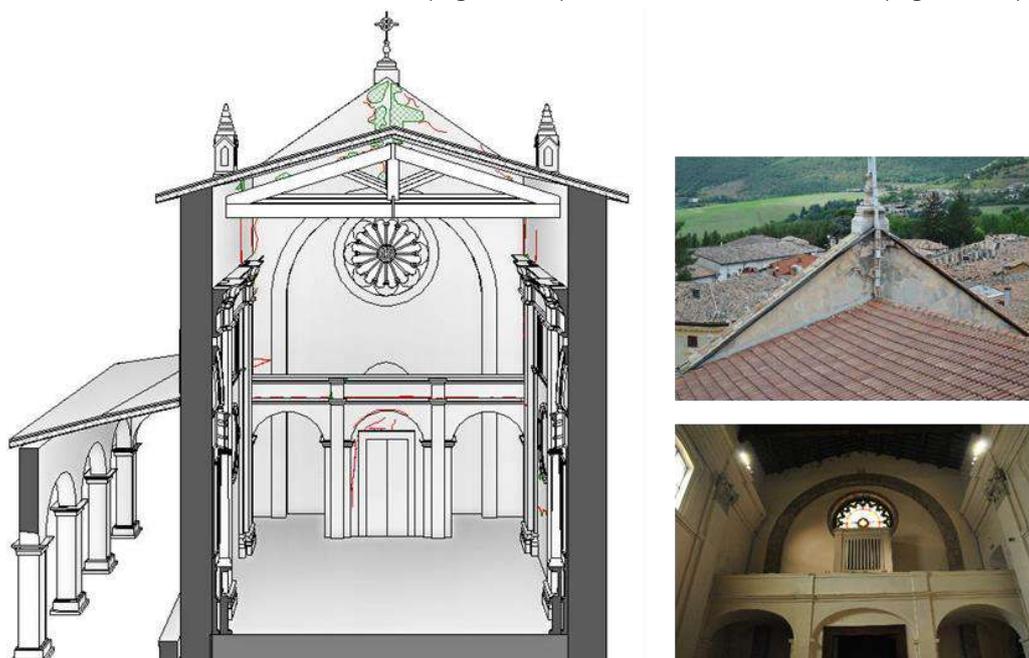


Figura 186 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo in controfacciata (sinistra) e rilievo fotografico (destra) [Archivio SABAP]



Figura 187 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo interno (sopra) e rilievo fotografico (sotto) [Archivio SABAP]



Figura 188 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo arcone trionfale (sinistra) e rilievo fotografico (destra) [Archivio SABAP]

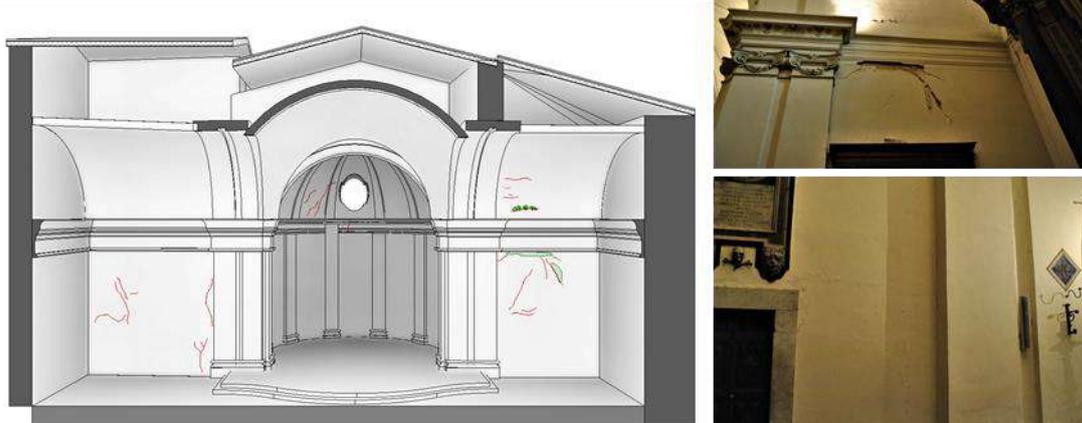


Figura 189 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo zona transetto e abside (sinistra) e rilievo fotografico (destra) [Archivio SABAP]

7.2 SISMA DEL 26 OTTOBRE 2016

Il 26 ottobre si verificano nella zona due forti scosse sismiche, seguite poi da numerose repliche di magnitudo maggiore. Il primo terremoto è stato registrato alle 19:10, 5 km più a sud di quello registrato alle 21:18, al confine tra la provincia di Macerata e quella di Perugia. I due terremoti presentavano, rispettivamente, una magnitudo 5,4 Mw e 5,9 Mw della scala Richter [INGV, 2016b]. I due terremoti risultano significativi soprattutto in relazione alla maggiore vicinanza dell'epicentro alla città di Norcia.

Gli eventi sismici in questione aggravano lo stato di danno della Basilica, già inagibile a causa del sisma verificatosi solo due mesi prima. Il materiale a disposizione per verificare lo stato dei luoghi a seguito del 26 ottobre è stato messo a disposizione dal NIS (Nucleo Interventi Speciali) dei Vigili del Fuoco, che ha condotto un sopralluogo all'interno della Basilica mediante l'utilizzo di un drone in data 29 ottobre.

Anche con questo secondo sisma i maggiori danni si concentrano nella parete destra della navata, causando crolli estesi che coinvolgono la parte superiore del primo altare, compreso di trabeazione, capitelli e decorazioni (Figura 190). Le riprese con il drone, da cui sono state ricavate le immagini, si sono fermate nella zona della navata principale, e quindi non è visibile la situazione di transetto e abside, che si suppone comunque essersi aggravata.

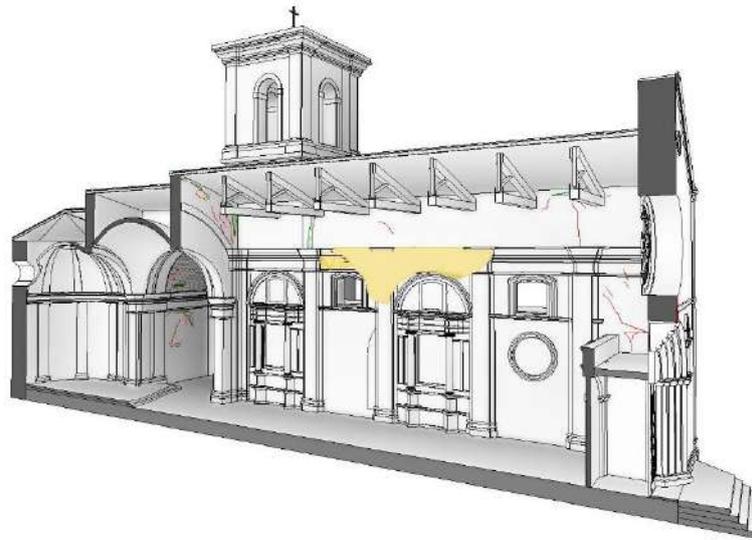


Figura 190 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo interno (sopra) e rilievo fotografico (sotto)
[Archivio SABAP]

All'esterno, invece, si possono osservare fessurazioni lievi in facciata, dove sono state eseguite operazioni di smontaggio a seguito della precedente scossa sismica dei due pinnacoli e della croce. Si nota, inoltre, il crollo di alcune tegole del tetto nella parte adiacente la facciata (Figura 191).

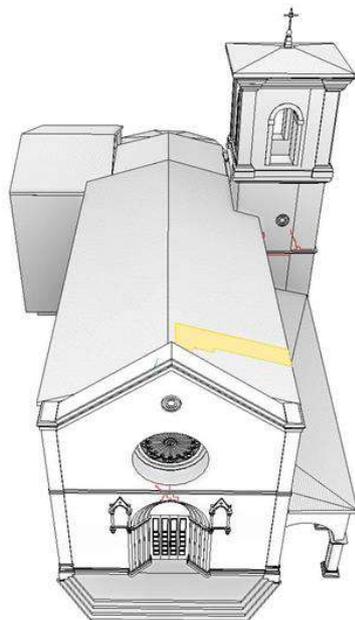


Figura 191 - Modellazione Revit, individuazione quadro fessurativo esterno (sinistra) e rilievo fotografico (destra)
[Archivio SABAP]

7.3 SISMA DEL 30 OTTOBRE 2016

Il sisma del 30 ottobre 2016, responsabile del quasi totale crollo della Basilica di San Benedetto, si è verificato alle ore 7.40 italiane, con magnitudo 6,5 Mw e magnitudo Richter 6,1. Il terremoto ha interessato le provincie di Perugia e Macerata e l'epicentro è collocato a 5 km da Norcia. Questo evento, data la vicinanza con l'epicentro, risulta quindi essere il più forte della sequenza sismica iniziata il 24 agosto di magnitudo 6,0 Mw [INGV, 2016c].

Questo terremoto ha prodotto il crollo di gran parte del campanile, compresa la cella campanaria, verso l'interno della chiesa. Si ha avuto quindi un conseguente sfondamento della copertura lignea a capriate, delle volte del transetto e dell'arco ogivale posto in corrispondenza tra navata e transetto. Di conseguenza si è verificato dunque lo sfondamento della pavimentazione, rendendo impossibile la visione dello stato dei luoghi della cripta, che è rimasta coperta di macerie fino a novembre 2020, mese in cui si è conclusa la rimozione delle macerie da tutta la Basilica. All'esterno si è verificato il crollo di buona parte delle pareti longitudinali della navata e il crollo totale del Portico delle Misure. I danni verificatisi sono visibili dalle immagini in Figura 192 e Figura 193. Si è dunque verificata la situazione per cui partendo dall'elemento più vulnerabile di tutti, il campanile, si è arrivati al crollo di quasi la totalità della Basilica. È stata eseguita in ambiente *Revit* una rappresentazione dettagliata dello stato di fatto della Basilica, come visibile in Figura 194.



Figura 192 - Basilica di San Benedetto, immediato post sisma [DIP, 2020]



Figura 193 - Basilica di San Benedetto sfondamento della pavimentazione, foto campagna indagini novembre 2020

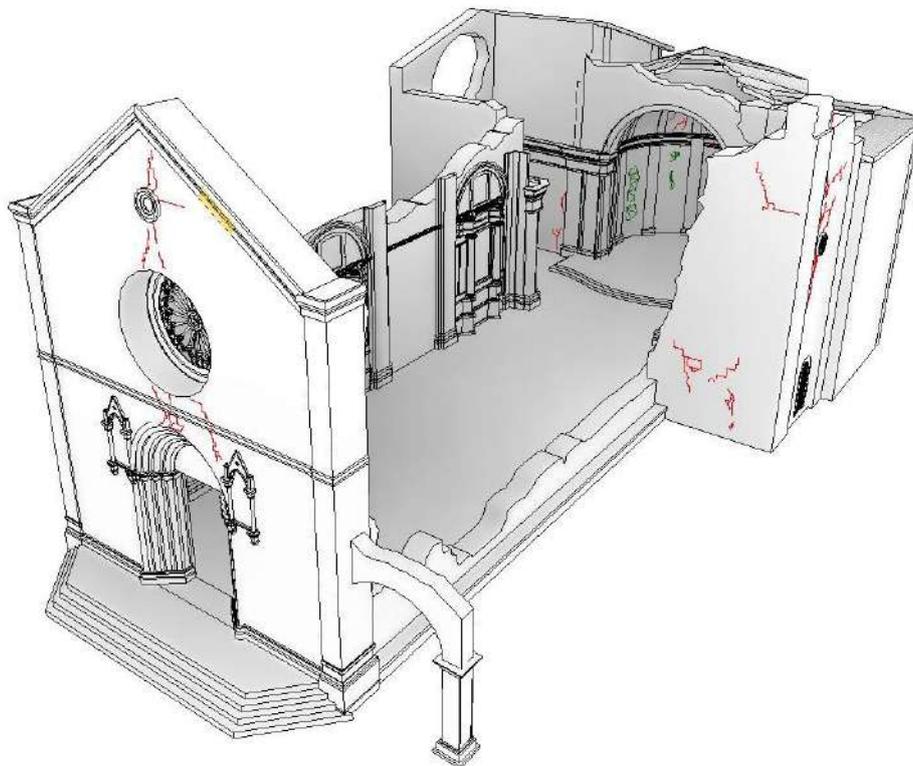


Figura 194 – Modellazione Revit, Stato di Fatto della Basilica di San Benedetto

In relazione ai singoli elementi costruttivi si può stimare in percentuale la muratura crollata all'interno della Basilica di San Benedetto, come si vede da Tabella 18 [DIP, 2020]:

Tabella 18 - Percentuale muratura crollata per ogni elemento

ELEMENTO	PERCENTUALE MURATURA CROLLATA
Facciata	< 5 %
Parete laterale sinistra navata	38 %
Parete laterale destra navata	69 %
Portico delle Misure	87 %
Transetto sinistro	18 %
Transetto destro	16 %
Abside	< 5 %
Campanile	60 %

Come si può notare dalle stime eseguite, la facciata è tra quegli elementi che si sono conservati quasi integri (Figura 195). Sono crollate solo alcune parti architettoniche riferibili al rosone e al cornicione superiore. I pinnacoli e la croce, posti a coronamento del timpano, sono stati smontati a seguito delle scosse del 24 agosto.

Oggetto di smontaggio controllato è stata anche la vetrata del rosone, che ha subito un'inflexione verso l'esterno, e che presenta fratture nette e passanti e distacchi di porzioni lapidee. Anche il portale di accesso alla Basilica mostra sconnessioni, rotazioni e slittamento dei conci.



Figura 195 - Facciata, immediato post sisma 30 ottobre [DIP, 2020]

In controfacciata era presente la cantoria dell'organo, la cui parte centrale era rimasta in piedi (Figura 196) a seguito del sisma ed è stata oggetto di smontaggio nella fase di messa in sicurezza.



Figura 196 - Cantoria, immediato post sisma 30 ottobre [DIP, 2020]

La parete laterale di sinistra è strettamente connessa con le murature del convento adiacente e tra le due pareti longitudinali è quella che ha subito meno danni (Figura 197). La presenza del convento ha fatto in modo che i crolli abbiano interessato solo la parte più alta della parete. Come evidenziato già nelle vicende storiche, il crollo evidenzia la presenza dell'imbotte di una finestra gotica, che lascia presumere che il convento avesse un'altezza minore prima della fase settecentesca. È proprio dal crollo che si evidenzia la sola giustapposizione dei muri del '500 con le murature del '700. In modo particolare, in corrispondenza secondo altare è molto evidente la presenza di due grandi archi, uno riconducibile alla fase gotica e quello interno più basso, aggiunto insieme alle rifodere del '700 (Figura 198).



Figura 197 - Parete longitudinale sinistra, immediato post sisma 30 ottobre [DIP, 2020]



Figura 198 - Dettaglio finestra tamponata e archi, immediato post sisma 30 ottobre [DIP, 2020]

La parete laterale destra, che si affaccia sul Portico delle Misure, è quasi interamente crollata, insieme al portico stesso (Figura 199). Sono rimaste a terra le basi dei pilastri del portico. Il crollo quasi totale di questa porzione sembra confermare il fatto che la Basilica sia stata sollecitata maggiormente in direzione trasversale (parallelamente alla facciata) determinando quindi un fuori piano di entrambe le pareti laterali della navata.

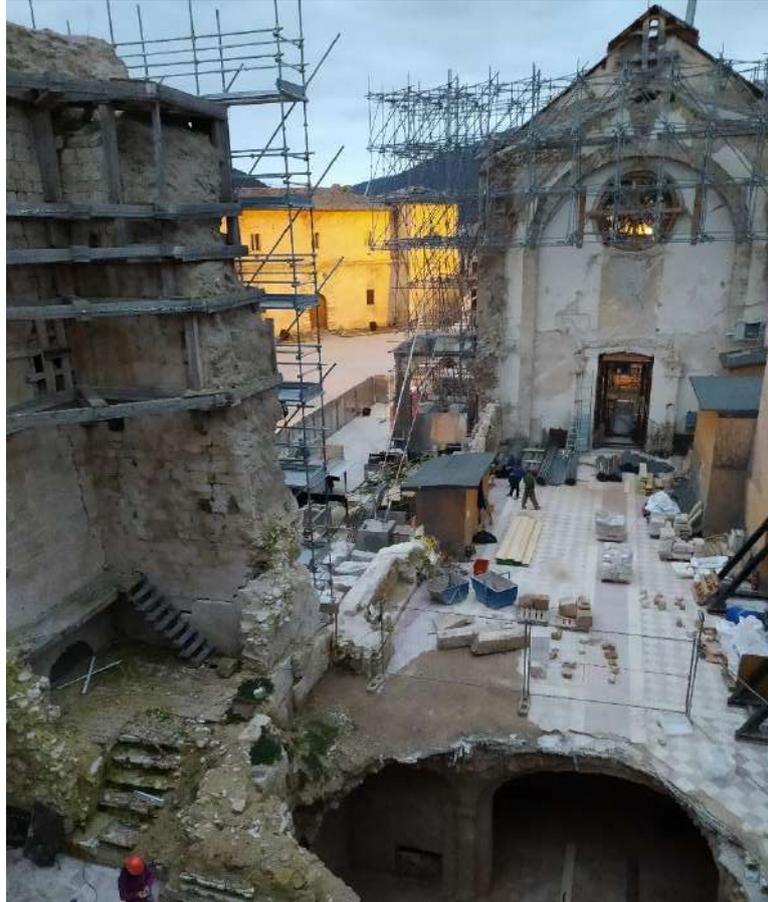


Figura 199 – Vista dall'interno della parete longitudinale destra e del Portico delle Misure crollati, foto campagna indagini novembre 2020

Abside e i due transetti non presentano crolli consistenti (Figura 200). Questo comportamento è probabilmente dovuto alla forma semichiusa dell'elemento strutturale. Presentano però diverse lesioni in corrispondenza delle aperture, soprattutto nella zona absidale, che sono state riportate all'interno del modello H-BIM creato in ambiente Revit (Figura 201).



Figura 200 - Abside e transetto, immediato post sisma 30 ottobre [DIP, 2020]

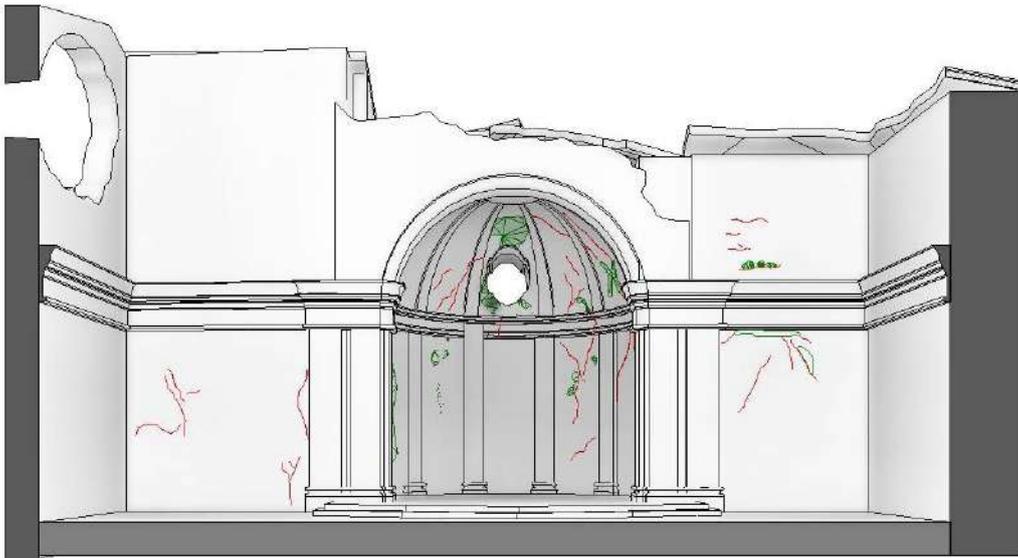


Figura 201 - Modellazione Revit, fessurativo abside e transetto

Il campanile può essere considerato il nodo del crollo della Basilica di San Benedetto. Il crollo verso l'interno della Basilica ha evidenziato che la parete aggiunta con gli interventi del '700 non era ammassata al transetto. Essa risultava essere una parete giustapposta alla muratura adiacente, mediante una geometria di incastri di non facile intuizione (Figura 202).



Figura 202 - Rilievo fotografico della muratura non ammassata, foto campagna indagini novembre 2020

Le lesioni sono di tipo passante e sono sviluppate prevalentemente in direzione diagonale. In modo particolare si evidenzia la fessura che parte da sotto la finestrella circolare e prosegue obliqua fino alla base del campanile, lasciando presupporre un fenomeno di scorrimento e ribaltamento dell'angolata libera verso l'esterno (Figura 203 e Figura 204).

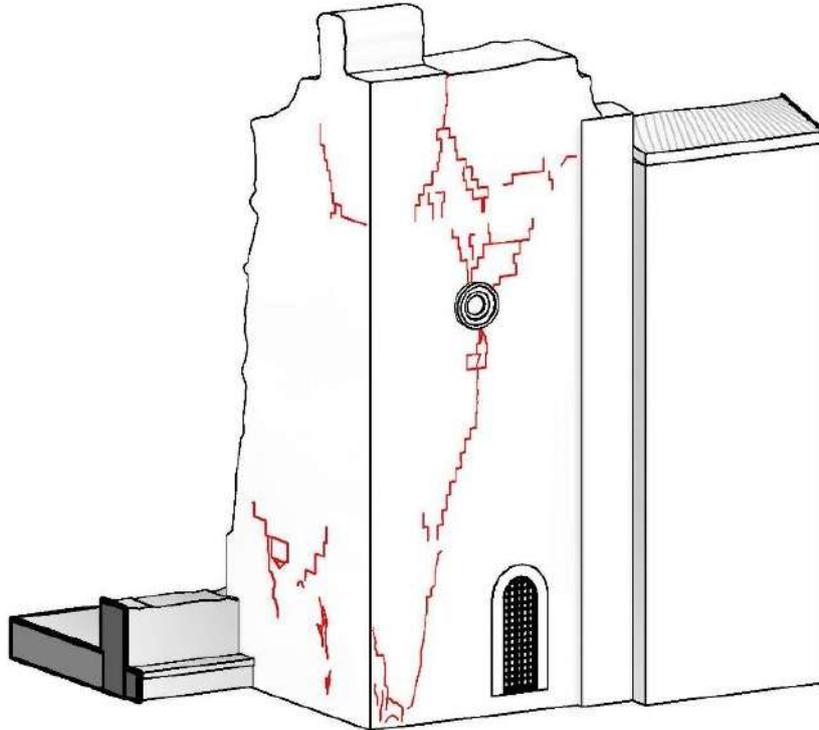


Figura 203 – Modellazione Revit, fessurativo campanile



Figura 204 - Campanile, immediato post sisma 30 ottobre [DIP, 2020]

Si può notare, inoltre, dall'osservazione *in situ* della parte rimanente del campanile, la presenza di un fenomeno di rotazione della parte sommitale (Figura 205).

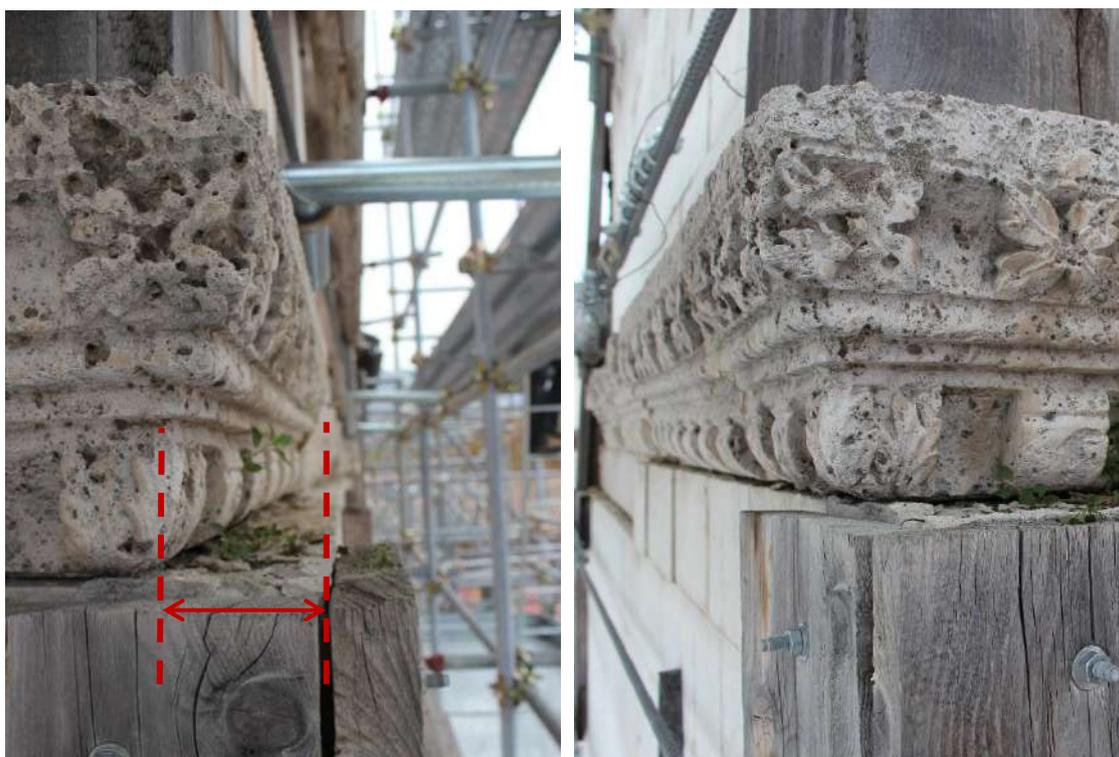


Figura 205 - Campanile, fenomeno di rotazione della parte sommitale, foto campagna indagini novembre 2020

7.4 EVOLUZIONE DANNO

Finora è stata riportata una descrizione del danno che ha colpito la Basilica di San Benedetto a Norcia dal primo evento sismico del 24 agosto 2016 fino all'evento sismico del 30 ottobre 2016 che ha portato al crollo quasi totale dell'edificio. Valutando, però, l'evoluzione del danno è possibile comprendere come si sia arrivati allo stato di fatto attuale della Basilica. In modo particolare, è interessante analizzare l'evoluzione del danno visibile dalle due sezioni trasversali della Basilica.

In Figura 206 si osserva il danno che ha colpito la navata laterale sinistra nel lato del Portico delle Misure. Si può vedere come il danno in questo caso abbia interessato solo la trabeazione in corrispondenza del primo altare e lievi fessurazioni diffuse in tutta la parete. Il danno in questione si è andato ad aggravare con l'evento sismico del 26 ottobre 2016, che ha causato il crollo più esteso di quella parte già danneggiata con il precedente sisma, coinvolgendo quindi una porzione molto maggiore di trabeazione ed il crollo di porzioni di cornici e del capitello della colonna. Il danneggiamento diffuso che si è evidenziato e in seguito al quale si è dichiarata l'inagibilità della Basilica poteva essere considerato come un sintomo di una situazione di forte instabilità in quel punto. In Figura 206, più precisamente nella sezione prospettica in basso, si può osservare come l'ultima scossa sismica del 30 ottobre 2016 abbia portato al crollo quasi totale di quella parete, già fortemente indebolita dalle precedenti scosse.



Figura 206 - Confronto quadro fessurativo navata destra: 24 agosto (sopra), 26 ottobre (centro) e 30 ottobre (sotto)

La stessa situazione è riscontrabile anche dall'osservazione della sezione trasversale opposta, riguardante quindi la parete destra della navata (Figura 207). Allo stesso modo si possono evidenziare lesioni diffuse e distacchi generalizzati, unitamente all'evoluzione della situazione di danno con il crollo di porzioni di trabeazione. Anche in questo caso i crolli di porzioni interne alla Basilica rappresentano un segnale di debolezza ed instabilità che ha portato al crollo di tutta la parte sommitale della parete sinistra della navata.

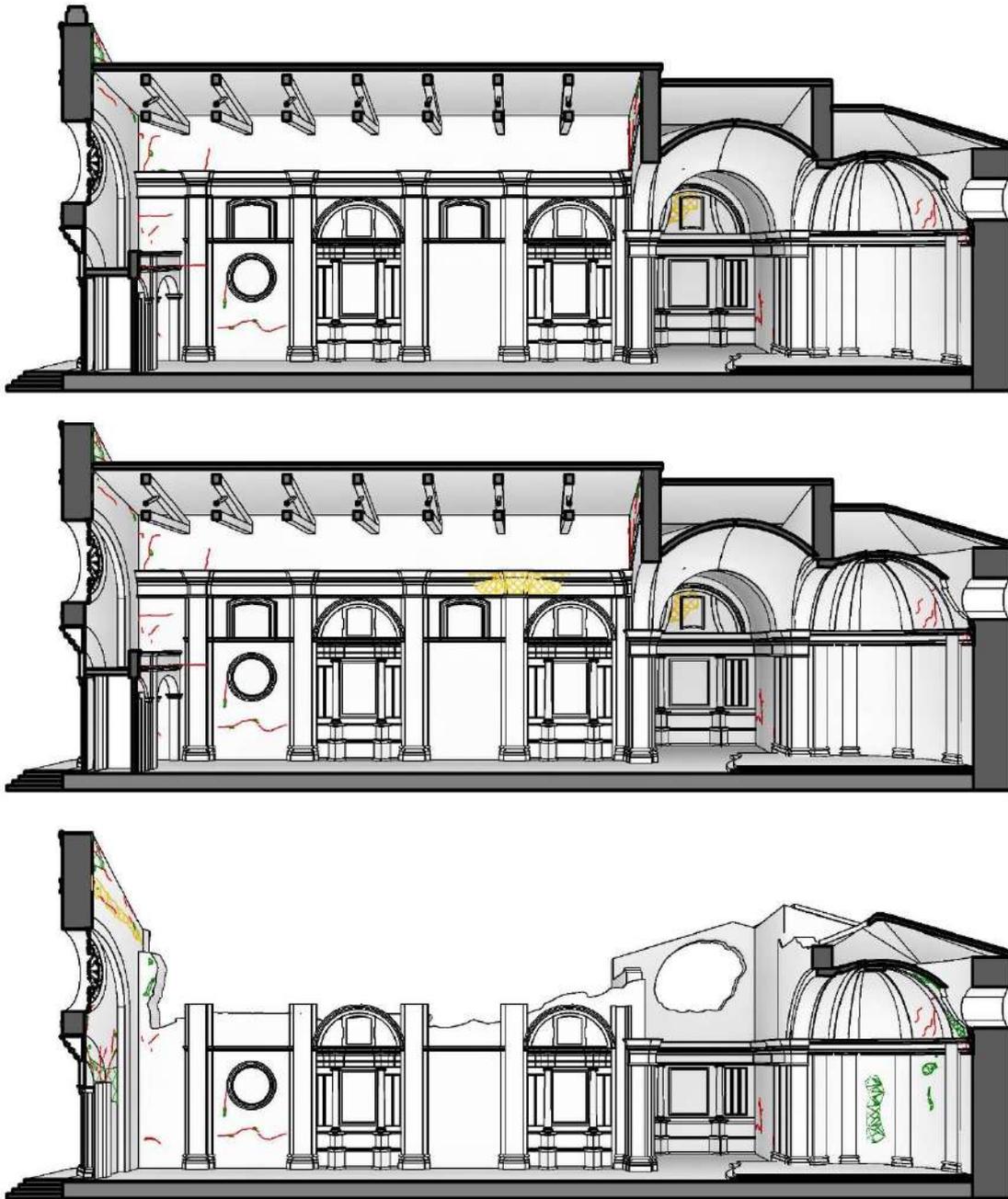


Figura 207 - Confronto quadro fessurativo navata sinistra: 24 agosto (sopra), 26 ottobre (centro) e 30 ottobre (sotto)

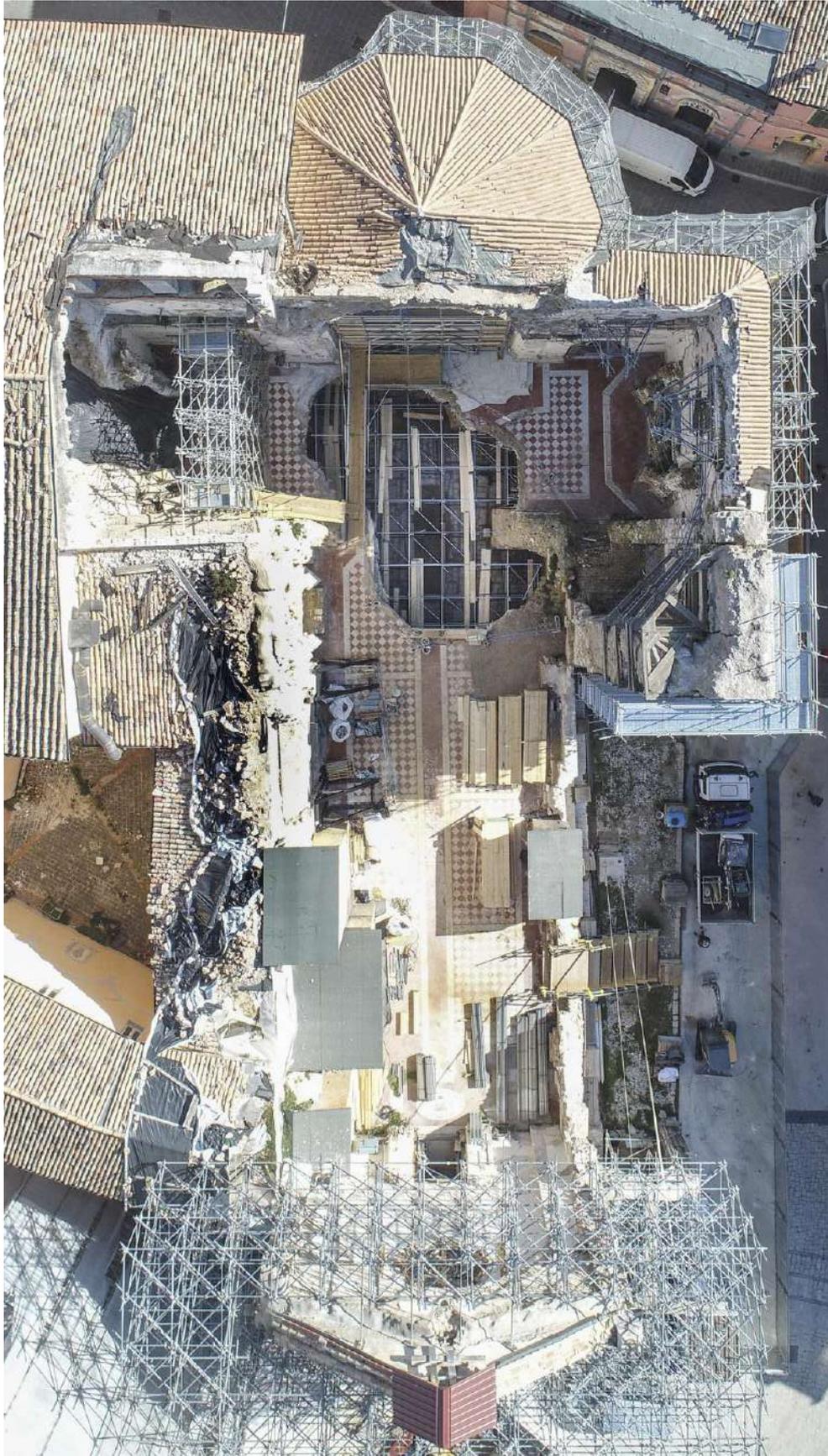


Figura 208 - Basilica di San Benedetto, completamento lavori messa in sicurezza [Archivio SABAP]

8. MODELLAZIONE A ELEMENTI FINITI (FEM) IN AMBIENTE DIANA

8.1 ANALISI DEI CARICHI

Come studio preliminare alla base dell'analisi strutturale della Basilica di San Benedetto è necessario effettuare un'analisi dei carichi agenti.

Le azioni agenti vengono definite e classificate nel seguente modo [NTC 2018]:

- Azioni permanenti G, corrispondenti a forze che agiscono durante tutta la vita nominale dell'edificio. Esse si distinguono in peso proprio degli elementi strutturali (G_1) e peso proprio degli elementi non strutturali (G_2).
- Azioni variabili Q, azioni che agiscono con valori istantanei che possono risultare diversi tra loro nel corso della vita nominale della struttura. Esse comprendono i sovraccarichi, le azioni del vento e della neve o della temperatura.
- Azioni eccezionali A, comprendono azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita dell'edificio.
- Azioni sismiche E, azioni derivanti da terremoti.

Per il caso studio della Basilica di San Benedetto si procede con il calcolo delle azioni sismiche. Il calcolo delle azioni sismiche è dato dalla somma dei carichi permanenti e dalla sommatoria delle azioni variabili [NTC 2018] come riportato in eq. (27):

$$E = G_1 + G_2 + \sum \psi_{2j} Q_{kj} \quad (27)$$

Tenendo conto, in riferimento al carico variabile neve, di un $\psi_{2,j} = 0,0$ per neve a quota ≤ 1000 m s.l.m [NTC 2018] per il calcolo delle azioni sismiche si fa riferimento, dunque, ai soli carichi permanenti G ($G_1 + G_2$) delle coperture che gravano sulle murature della Basilica.

8.1.1 Copertura navata

La copertura della navata (Figura 209) è stata ipotizzata sulla base delle immagini pre-sisma, dei disegni relativi al progetto del 1998 ed in parte dalle evidenze emerse a seguito del sisma. Si tratta di una copertura realizzata in legno, costituita da capriate distanziate l'una dall'altra 3,20 m, seguite da arcarecci e morali. Nella parte non strutturale si ipotizza nell'ordine in cui vengono descritte, la presenza di tavelle di spessore 3 cm, un getto di 6 cm, la presenza di una guaina impermeabilizzante - come visibile da altre immagini riguardanti altre porzioni di copertura - e i coppi in singola (Figura 210).

Il peso totale della copertura risulta dunque essere di 336 kg/m^2 , come visibile dettagliatamente in Tabella 19.



Figura 209 - Copertura navata principale Basilica di San Benedetto [Archivio SABAP]

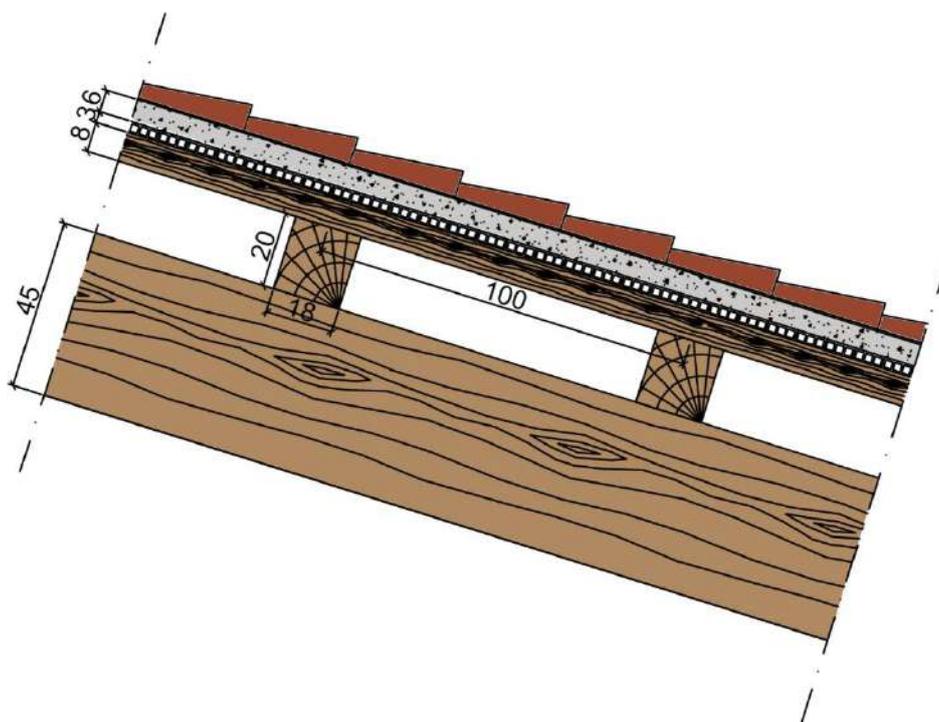


Figura 210 - Copertura navata principale, sezione in scala 1:20 (quote in cm)

Tabella 19 - Peso copertura navata principale

STRATO		GEOMETRIA		GAMMA	PESO
		[Sezione]	[Passo]		
		[cm]		[kg/m ³]	[Kg/m ²]
G1	Capriata	45x40	320	450	25
	Arcarecci	20x18	100	450	16
	Morali	8x8	25	450	12
G2	Tavelle		3	1800	54
	Getto calcestruzzo		6	2400	144
	Guaina impermeabilizzante		-	-	25
	Coppi in singola		-	-	60
				tot.	336

8.1.2 Copertura Portico delle Misure

Il Portico delle Misure è costituito da una copertura in legno (Figura 211), sostituita con gli interventi degli anni Cinquanta del '900. Essa presenta dei puntoni, con passo 3,50 m, arcarecci e morali. La parte non strutturale si ipotizza uguale a quella descritta per la navata principale (Figura 212), considerando che con gli interventi dal 1959 si è eseguito il rialzo della copertura principale, e quindi la sua contemporanea realizzazione.

Il peso totale della copertura risulta dunque essere di 324 kg/m², come visibile dettagliatamente in Tabella 20.

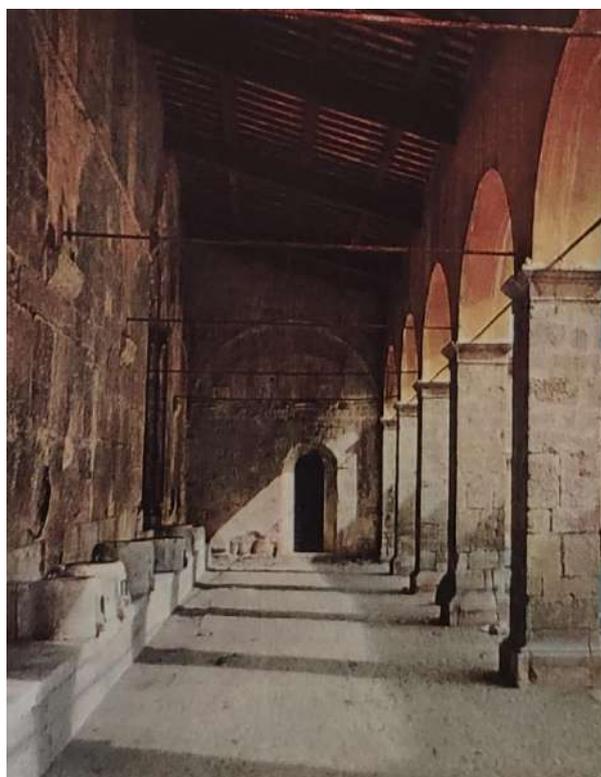


Figura 211 - Copertura Portico delle Misure [Archivio SABAP]

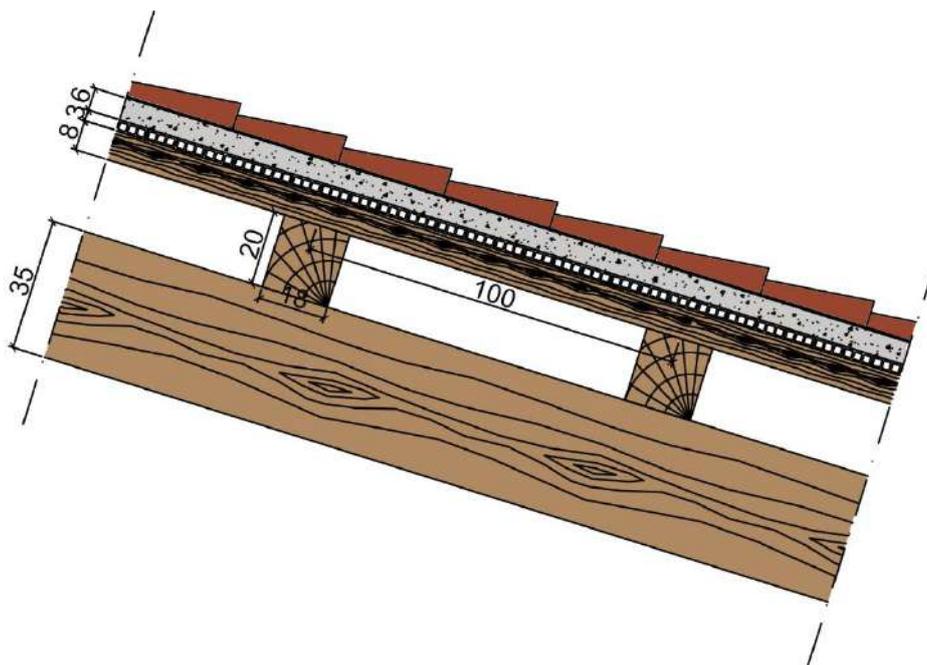


Figura 212 - Copertura Portico delle Misure, sezione in scala 1:20 (quote in cm)

Tabella 20 - Pesi copertura Portico delle Misure

STRATO		GEOMETRIA		GAMMA	PESO
		[Sezione]	[Passo]		
		[cm]		[kg/m ³]	[Kg/m ²]
G1	Puntone	35x30	350	450	13
	Arcarecci	20x18	100	450	16
	Morali	8x8	25	450	12
G2	Tavelle		3	1800	54
	Getto calcestruzzo		6	2400	144
	Guaina impermeabilizzante		-	-	25
	Coppi in singola		-	-	60
				tot.	324

8.1.3 Copertura transetto destro e abside

La copertura del transetto di destra e dell'abside è costituita da un puntone in legno, sormontato da tavelloni e un getto di calcestruzzo (Figura 214). Anche in questa copertura sono presenti coppi in singola. È in questo caso che si nota la presenza della guaina impermeabilizzante (Figura 213) e che è stata supposta essere presente in tutte le tipologie di copertura.

Il peso totale della copertura risulta dunque essere di 364 kg/m², come visibile dettagliatamente in Tabella 21.



Figura 213 - Copertura transetto destro e abside

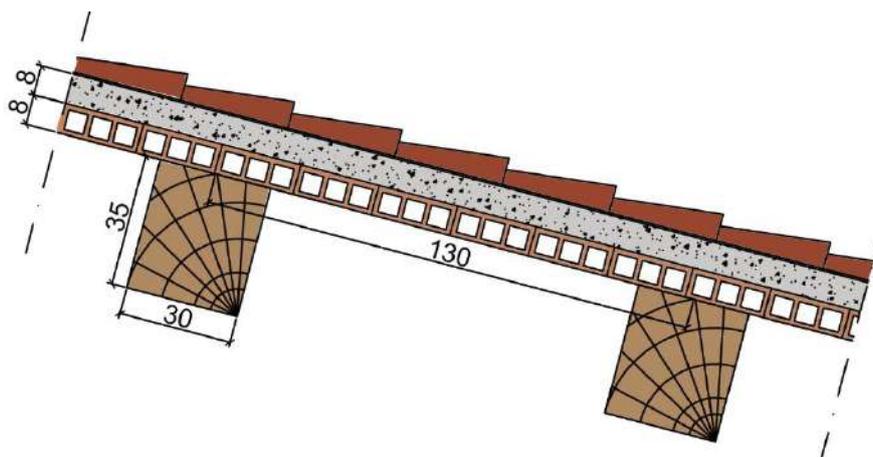


Figura 214 - Copertura transetto destro e abside, sezione in scala 1:20 (quote in cm)

Tabella 21 - Pesi copertura transetto destro e abside

STRATO		GEOMETRIA		GAMMA	PESO
		[Sezione]	[Passo]		
		[cm]	[cm]	[kg/m ³]	[Kg/m ²]
G1	Puntone	35x30	130	450	37
G2	Tavelloni		8	630	50
	Getto calcestruzzo		8	2400	192
	Guaina impermeabilizzante		-	-	25
	Coppi in singola		-	-	60
				tot.	364

8.1.4 Copertura transetto sinistro

La copertura del transetto sinistro, invece, è una copertura in laterocemento (Figura 216). Le punte delle travi visibili in Figura 215 corrispondono alla copertura precedente i restauri del 1900. Il peso totale della copertura risulta dunque essere di 385 kg/m², come visibile dettagliatamente in Tabella 22.



Figura 215 - Copertura transetto sinistro

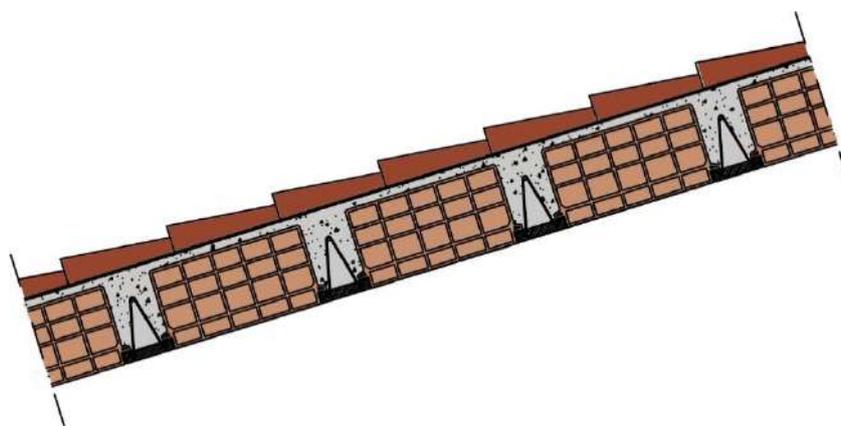


Figura 216 - Copertura transetto sinistro, sezione in scala 1:20

Tabella 22 - Pesi copertura transetto sinistro

STRATO		GEOMETRIA		GAMMA	PESO
		[Sezione]	[Passo]		
		[cm]		[kg/m ³]	[Kg/m ²]
G1	Latero cemento	24 (20+4)		-	300
G2	Guaina impermeabilizzante	-		-	25
	Coppi in singola	-		-	60
				tot.	385

8.2 DEFINIZIONE DEL MODELLO IN DIANA PER ANALISI FEM

8.2.1 Modellazione geometrica

Per la modellazione al fine dell'analisi in DIANA FEA_{BV} è stato scelto di realizzare un modello tridimensionale, alla luce dell'importanza che riveste lo spessore di alcune pareti che compongono la Basilica, che quindi assumono un certo significato nella modellazione: si ricorda, ad esempio, la base del campanile che raggiunge uno spessore maggiore di due metri.

Si realizza quindi un modello tridimensionale, rappresentativo degli spessori reali delle pareti, con una semplificazione della geometria su elementi non strutturali come, ad esempio, elementi architettonici o decorazioni. Il modello così realizzato in AutoCAD viene importato all'interno del programma DIANA FEA_{BV} per l'analisi strutturale, così come mostrato in Figura 217.

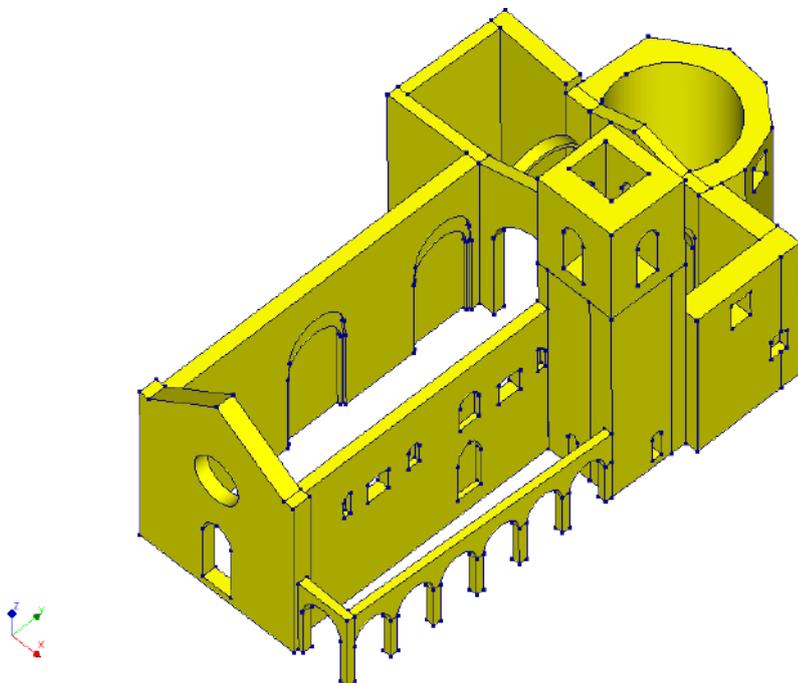


Figura 217 - Modello della Basilica di San Benedetto in ambiente DIANA FEA_{BV}

La copertura della Basilica, invece, viene trattata come un elemento bi-dimensionale e riveste particolare importanza nel conferire un comportamento globale all'edificio. Vengono, inoltre, inseriti i pesi della copertura, calcolati al Capitolo 8.1, come masse puntuali (Figura 218).

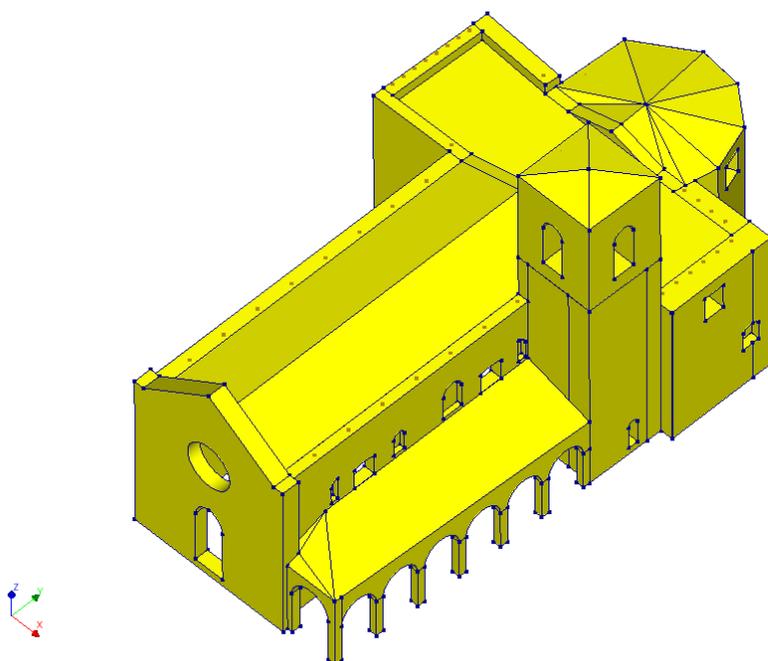


Figura 218 – Modello della Basilica di San Benedetto in ambiente DIANA FEA_{BV}

Innanzitutto, sono state attribuite le proprietà agli *shapes* che costituiscono il modello. Per ogni elemento viene quindi definita la classe dell'elemento, il materiale e la geometria, come discusso nei paragrafi a seguire.

8.2.2 Muratura

Per le murature la classe di elemento utilizzata è *structural solids*. Il materiale assegnato alla muratura è *concrete and masonry*. La definizione delle proprietà meccaniche caratteristiche della muratura sono state quelle ottenute mediante l'analisi di qualità muraria, visibili al Capitolo 6 e riportate in Tabella 23.

Tabella 23 - Proprietà meccaniche della muratura [Circolare 2019]

Muratura a conci sbozzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo						
Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	fv_0 (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
min	2,0	0,035	0	1020	340	20
max	3,0	0,051	0	1440	480	20
medio	2,5	0,043	0	1230	410	20

La muratura è stata trattata, dapprima, con un comportamento elastico lineare (*linear elastic isotropic*), inserendo il modulo elastico E , la densità del materiale w e il valore del coefficiente di Poisson ν . Quest'ultimo dato non trova una specifica indicazione in normativa. Per un materiale isotropo e omogeneo la relazione tra il coefficiente di Poisson ν e il modulo a taglio G è definita come in eq. (28):

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (28)$$

Dove: E = modulo elastico;

G = modulo a taglio.

Viene preso un valore di ν pari a 0.25.

Per valutare la non linearità, invece, il modello costitutivo descrive il comportamento a trazione e a compressione del materiale con una relazione sforzo-deformazione differente per i due stati tensionali, a cui è associato un valore dell'energia di frattura. Il materiale ha dunque un comportamento descritto dal legame costitutivo *Total Strain Based Crack Model*, come spiegato al Capitolo 2.8.2, e le proprietà meccaniche inserite sono quelle che figurano in Tabella 24.

Tabella 24 - Proprietà meccaniche della muratura

E (N/mm ²)	w (kN/m ³)	ν	f_c (N/mm ²)	f_t (N/mm ²)	G_c (N/mm)	G_t (N/mm)
1230	20	0,25	1,67	0,0437	2,672	0,00128

I valori di resistenza a trazione e compressione sono stati valutati come espresso in eq. (29) e in eq. (30).

$$f_c = \frac{f_m}{FC} \quad (29)$$

$$f_t = \frac{1,5 \cdot \tau_0}{FC} \quad (30)$$

Dove: f_m = resistenza media a compressione;
 τ_0 = resistenza media a trazione;
 FC = fattore di confidenza.

Il diagramma scelto per rappresentare il comportamento a trazione del materiale è un diagramma *esponenziale*, mentre il comportamento a compressione viene descritto da un diagramma di tipo *parabolico* (Figura 219).

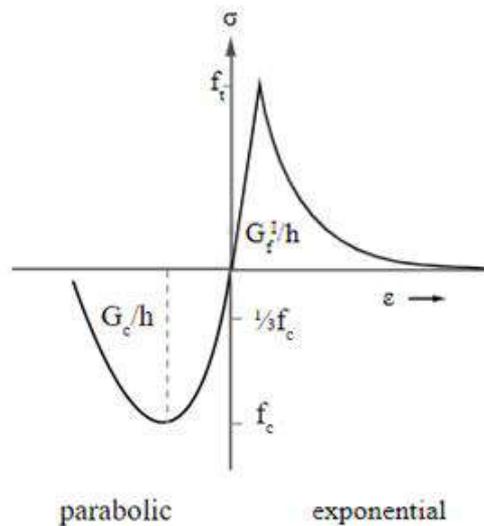


Figura 219 - Diagrammi del comportamento a trazione e compressione
 [DIANA FEA BV 2020]

Per calcolare le rispettive energie di frattura sono stati utilizzati i valori d_u pari a 1,6 mm per la compressione e d_u pari a 0,029 mm per il comportamento a trazione [Lourenço, 2009].

Da questi valori è stato possibile ricavare il valore dell'energia di frattura sia per il comportamento a compressione G_c che a trazione G_t , mediante equazioni (31) e (32):

$$d_u = \frac{G_c}{f_c} \quad (31)$$

$$d_u = \frac{G_t}{f_t} \quad (32)$$

Dove: G_c = energia di frattura a compressione;
 G_t = energia di frattura a trazione;
 f_c = resistenza a compressione;
 f_t = resistenza a trazione.

Il valore della resistenza a trazione è stato valutato in due modi: come $1,5\tau_0$ [NTC 2018] e come $f_t/20$ [Cescatti, 2016]. I due metodi forniscono valori significativamente diversi. Per questo motivo, nelle analisi che seguiranno, si procede raddoppiando anche il valore della energia di frattura.

8.2.3 Coperture

Le coperture sono state trattate con un comportamento elastico lineare (*linear elastic isotropic*), inserendo nella definizione del materiale il modulo elastico E , ipotizzato circa 500 MPa e il valore del coefficiente di Poisson ν , pari a 0,25. Dal punto di vista della modellazione, all'interno del materiale non viene inserita la densità, al fine di minimizzare le singolarità dovute alle forme modali. Per non trascurare, però, le masse esse sono state inserite in modo puntuale ad un passo definito e tenendo conto dell'area di influenza della singola trave della copertura. Questo passaggio risulta di fondamentale importanza in quanto le masse influenzano in modo significativo il comportamento globale dell'edificio.

Essendo gli elementi bidimensionali, ad esse viene associata anche la definizione della geometria, attribuendo a tali superfici uno spessore indicativo di 0,04 m.

8.2.4 Vincoli

Sono stati definiti, in seguito, i vincoli della struttura, visibili in Figura 220. I nodi sono stati vincolati tutti bloccando la traslazione ed ottenendo quindi un vincolo complessivo ad incastro.

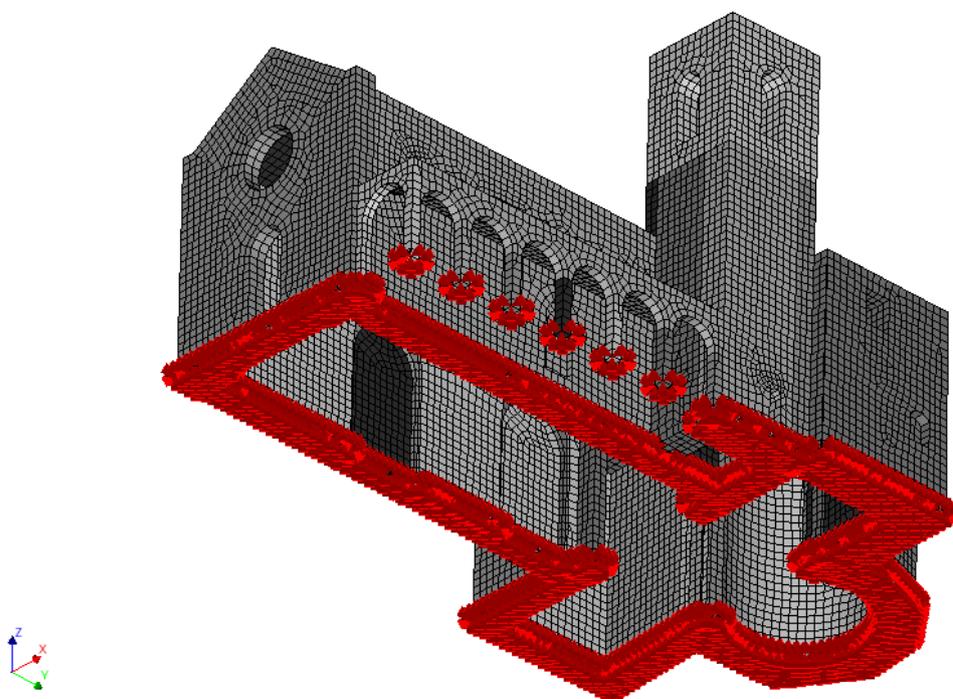


Figura 220 - Modello con vincolo al suolo in ambiente DIANA FEA BV

8.2.5 Discretizzazione

Nella definizione del modello la discretizzazione è definita in automatico da un *mesher* di tipo quadratico/esagonale e l'ordine di mesher definito è di tipo lineare, essendo la struttura modellata come un edificio tridimensionale.

Considerando la dimensione della Basilica e i relativi tempi di risoluzione, è stata utilizzata una *mesh* di 0.5 m, in cui l'elemento principale per le murature è stato l'elemento *brick* a 8 nodi HX24L (Figura 221). Per necessità nella costruzione della *mesh* vengono creati anche altri elementi a completamento di questo *brick*, quali l'elemento piramidale a 5 nodi PY15L (Figura 222), il tetraedro, a 3 lati e 4 nodi TE12L (Figura 223) ed, infine, l'elemento cuneo con 6 nodi TP18L (Figura 224). Si tratta in tutti e quattro i casi di elementi isoparametrici basati sull'interpolazione lineare.

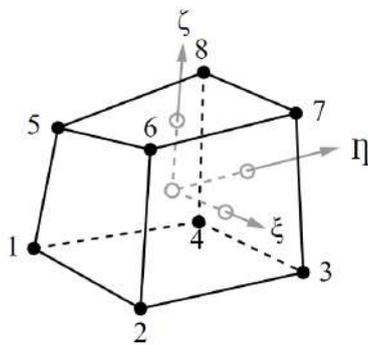


Figura 221 -Elemento brick (HX24L)
[DIANA FEA BV 2020]

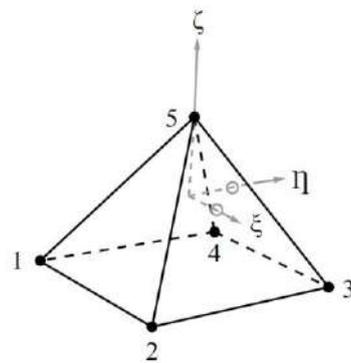


Figura 222 - Elemento piramidale (PY15L)
[DIANA FEA BV 2020]

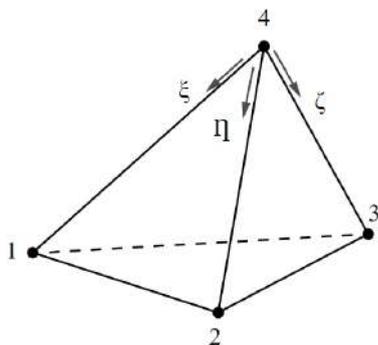


Figura 223 – Elemento tetraedrico (TE12L)
[DIANA FEA BV 2020]

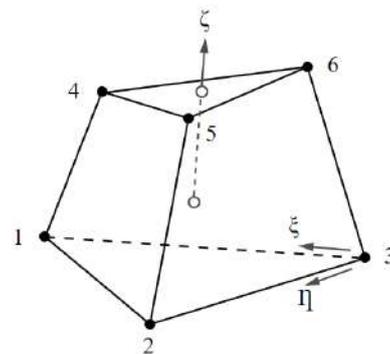


Figura 224 - Elemento cuneo (TP18L)
[DIANA FEA BV 2020]

Per quanto riguarda, invece, la discretizzazione della copertura è stata utilizzata sempre una *mesh* di dimensione 0.5 m. La classe utilizzata per definire queste coperture bi-dimensionali è *Regular Curved Shells*. Il tipo di elemento principale creato per la *mesh* è l'elemento quadrangolare a 4 nodi Q20SH (Figura 225). Per completezza della *mesh* viene creato automaticamente anche l'elemento triangolare, con tre nodi T15SH (Figura 226), entrambi isoparametrici.

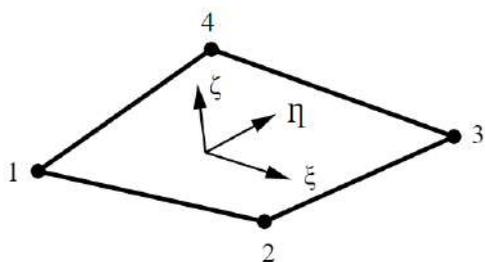


Figura 225 - Elemento quadrangolare (Q20SH)
[DIANA FEA BV 2020]

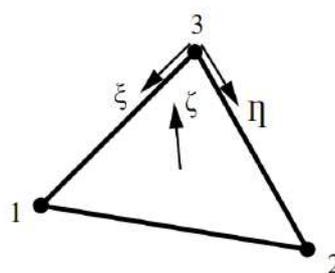


Figura 226 - Elemento triangolare (T15SH)
[DIANA FEA BV 2020]

Si ottiene, dunque, un modello che presenta complessivamente 42915 elementi e 43756 nodi. La Figura 227 mostra l'immagine 3D del modello su DIANA FEA BV dopo avere eseguito la *mesh*.

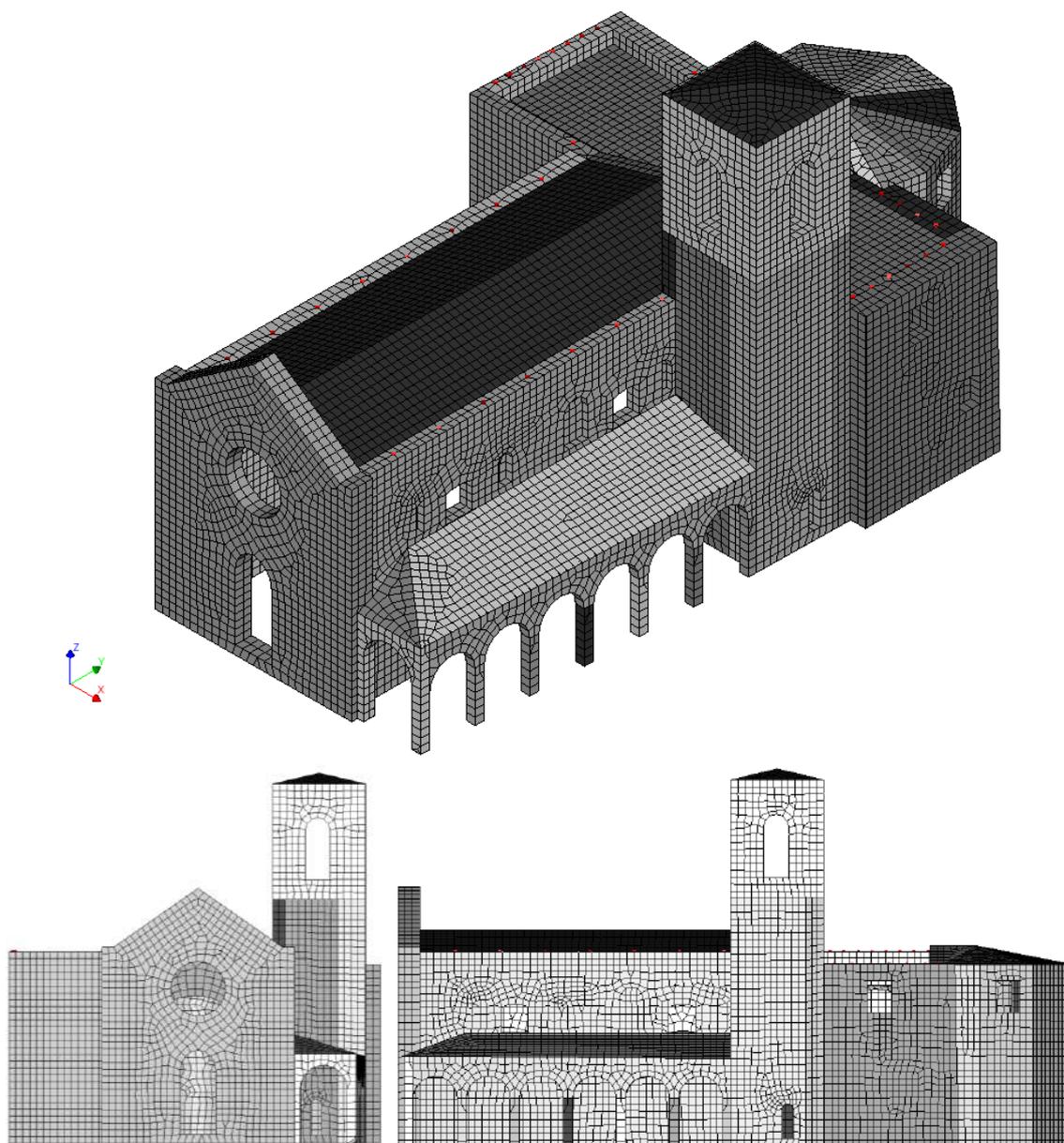


Figura 227 - Mesh del modello 3D della Basilica di San Benedetto

8.3 ANALISI STATICA LINEARE

Una volta definito il modello la prima analisi eseguita è stata un'analisi statica lineare, al fine di poter studiare il comportamento della struttura e poter valutare la correttezza della modellazione. Gli spostamenti maggiori si sono verificati nella torre, come visibile dalla Figura 228, il cui valore massimo di spostamento è di circa 5 mm.

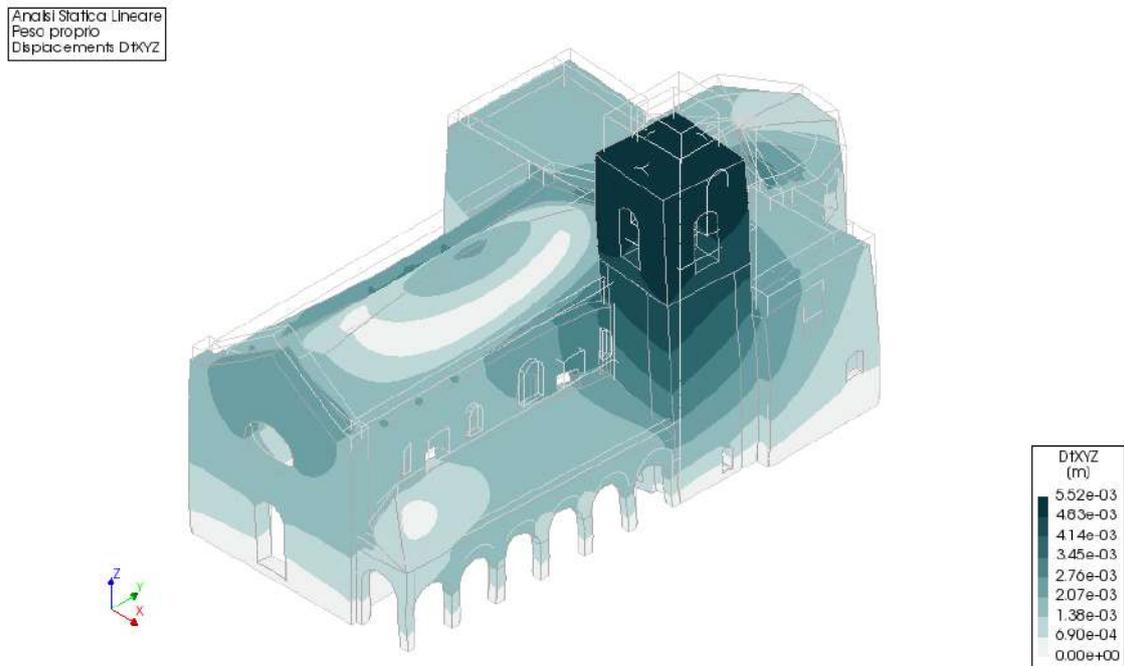


Figura 228 - Analisi statica lineare - Displacements DtXYZ

Per valutare la correttezza del modello realizzato, infine, si è proceduto con un confronto tra i valori delle reazioni vincolari in DIANA FEA_{BV} (Figura 229) e il peso effettivo della Basilica calcolato manualmente con l'aiuto di un *software CAD*.

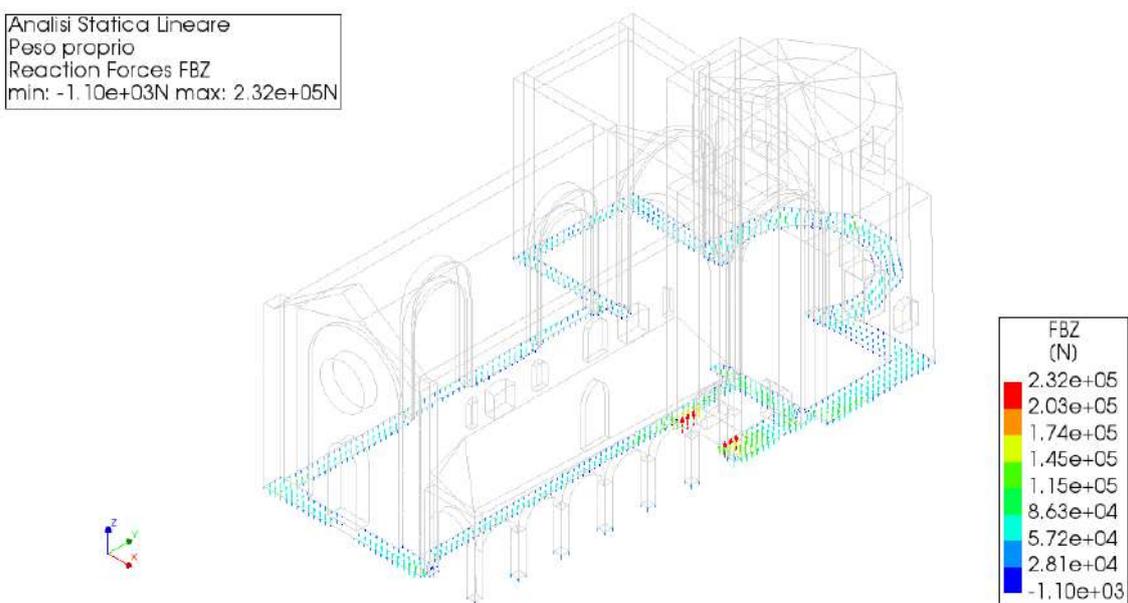


Figura 229 - Analisi statica lineare - Reaction forces FBZ

Il peso della Basilica calcolato manualmente è stato ottenuto moltiplicando il volume totale delle murature della Basilica per il peso della muratura, pari a 20 kN/m^3 .

Si ottengono quindi due valori che, come emerge dalla Tabella 25, possono essere considerati confrontabili, tenuto conto che al valore ottenuto in ambiente *Autodesk AutoCAD* calcolando solo il peso delle murature vengono sommati anche tutti i pesi delle singole coperture, approssimabili a circa $3,20\text{E}+05 \text{ N}$. Si ottiene così un peso totale che vede un errore di solo $0,01 \text{ N}$.

Tabella 25 - Analisi statica lineare - Confronto FBZ

DIANA FEA _{BV}	Calcolo manuale		
FBZ [N]	Murature [N]	Coperture [N]	Totale [N]
6,49E+07	6,39E+07	3,20E+05	6,42E+07

Si è proseguito poi con un confronto delle tensioni alla base del campanile e della facciata (Figura 230) con i valori derivanti dal calcolo manuale. Di seguito si riportano le tensioni rispettivamente del campanile e della facciata, la cui media risulta confrontabile con i valori calcolati manualmente con il modello AutoCAD (Tabella 26).

Analisi Statica Lineare
 Peso proprio
 Cauchy Total Stresses SZZ layer 1
 min: $-5.02\text{e}+06 \text{ N/m}^2$ max: $4.84\text{e}+06 \text{ N/m}^2$

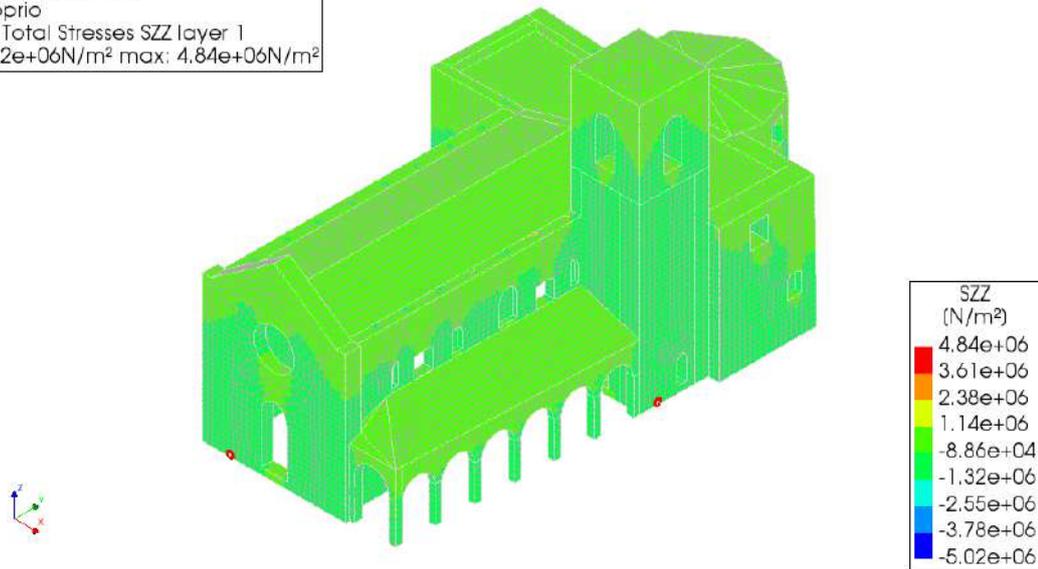


Figura 230 - Analisi statica lineare, SZZ - Elemento in facciata e campanile

Tabella 26 - Analisi statica lineare - SZZ facciata e campanile, confronto valori AutoCAD

NODI	FACCIATA SZZ [N/m ²]	CAMPANILE SZZ [N/m ²]
1	-405.970	-570.198
2	-392.843	-566.171
3	-392.843	-499.122
4	-405.970	-511.435
5	-303.637	-566.087
6	-311.143	-570.325
7	-311.143	-511.223
8	-303.637	-499.226
Media SZZ - DIANA	-3,53E+05	-5,37E+05
Valori AutoCAD	2,98E+05	4,92E+05

8.4 ANALISI MODALE

Si è proceduto con una seconda tipologia di analisi, denominata *structural eigenvalue*, volta ad individuare i principali modi di vibrare della parete e i relativi periodi.

L'approccio utilizzato da DIANA FEA_{BV} è quello usuale e riguarda la soluzione del problema degli autovalori, tenendo conto della rigidezza e delle distribuzioni delle masse [DIANA FEA_{BV} 2020]. Tale analisi potrebbe essere condotta mediante una soluzione del problema agli autovalori dell'equazione differenziale omogenea del moto, espressa come in eq. (33).

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (33)$$

A partire da questa equazione si può studiare il problema degli autovalori, come in eq. (34),

$$(K - \omega_n M)\Psi_n = 0 \quad (34)$$

Dove: ω_n = vettore autovalori;
 Ψ_n = matrice degli autovettori.

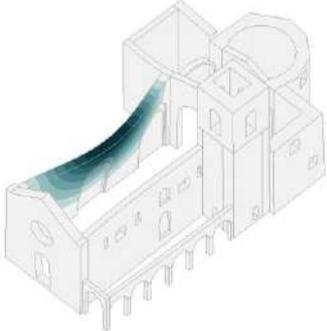
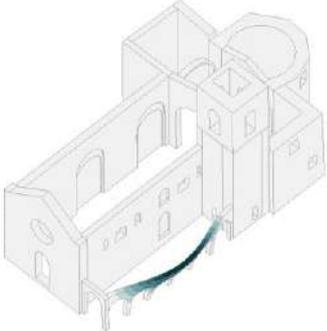
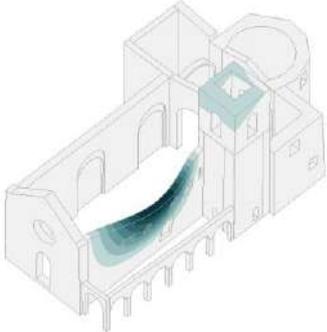
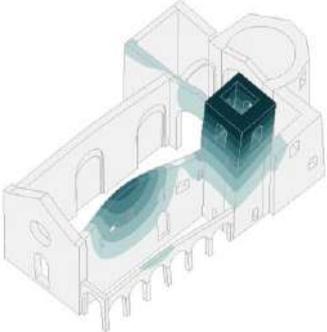
Il vettore degli autovalori ω_n rappresenta le frequenze modali e la matrice degli autovettori Ψ_n rappresenta le forme modali.

L'analisi dinamica modale, quindi, fornisce come risultato una misura del contributo di ciascun modo di vibrare alla risposta sismica del sistema. Per ciascun modo di vibrare ne viene individuata la massa partecipante. Come espresso dall'NTC 2018:

«Devono essere considerati tutti i modi con massa partecipante significativa. È opportuno a tal riguardo considerare tutti i modi con massa partecipante superiore al 5% e comunque un numero di modi la cui massa partecipante totale sia superiore all'85%» [NTC 2018].

Si può naturalmente osservare come l'analisi dinamica modale eseguita sul modello con le sole murature perimetrali non fornisca dei modi di vibrare globali per la Basilica, ma si individuino dei modi locali concentrati o sulle pareti delle navate o sul Portico delle Misure in particolare, che essendo un elemento molto snello risente molto delle spinte dovute alle sollecitazioni, mostrando grandi spostamenti, come visibile in Tabella 27. Come specificato precedentemente, le coperture rivestono, dunque, un ruolo fondamentale nel comportamento globale dell'edificio.

Tabella 27 - Analisi modale, modello senza coperture

MODO 1, DtXYZ	MODO 2, DtXYZ
<p data-bbox="245 864 389 891"> Analisi Modale Modo 1, Eigenfrequency 4033 Hz Displacement DtXYZ </p> 	<p data-bbox="818 864 962 891"> Analisi Modale Modo 2, Eigenfrequency 5789 Hz Displacement DtXYZ </p> 
<p data-bbox="245 1252 389 1279"> Analisi Modale Modo 3, Eigenfrequency 6759 Hz Displacement DtXYZ </p> 	<p data-bbox="818 1252 962 1279"> Analisi Modale Modo 4, Eigenfrequency 8819 Hz Displacement DtXYZ </p> 

Si è proceduto quindi con la realizzazione dell'analisi modale tenendo conto sia delle coperture, come elemento *regular curved shell*, che delle masse che rappresentano puntualmente i pesi delle coperture.

Specificando come output dell'analisi la realizzazione di 30 modi di vibrare si osserva che al trentesimo modo si raggiunge in X il 71% di massa partecipante e in Y il 66%. Facendo proseguire l'analisi, invece, arrivando a 100 modi di vibrare si riesce in X a superare il valore dell'85% di massa partecipante richiesto in normativa, mentre in Y viene raggiunto l'84%.

In Tabella 28 si possono osservare le frequenze, le percentuali di massa partecipante del modo di vibrare in X e in Y e le percentuali cumulative della massa partecipante relativa ai modi di vibrare più significativi tra i primi 30 modi e il centesimo modo.

Tabella 28 – Analisi modale

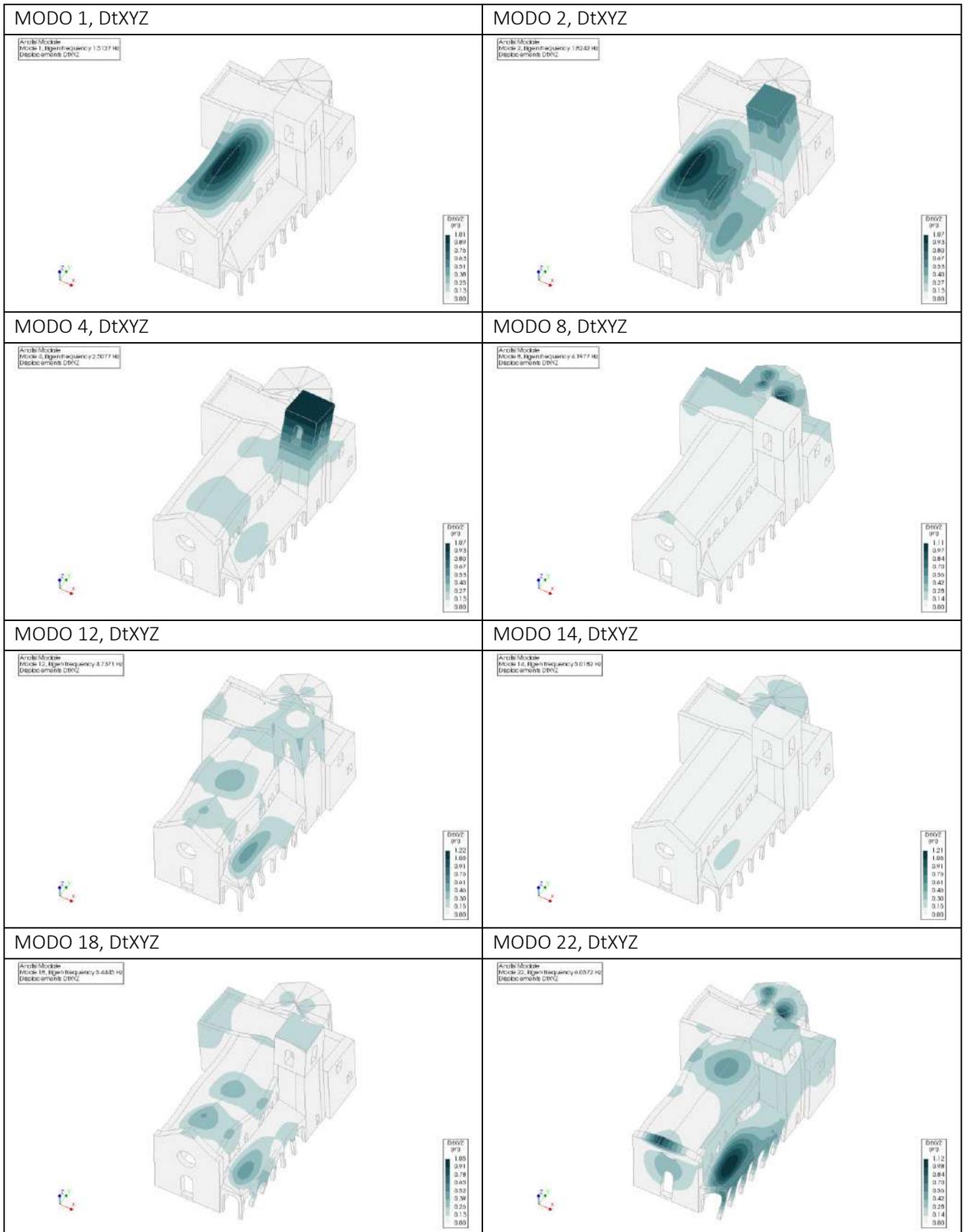
MODO	FREQUENCY [Hz]	PERCENTAGE	CUM.PERCENT.	PERCENTAGE	CUM.PERCENT.
		TX [%]	TX [%]	TY [%]	TX [%]
1	1,513	5,59	5,59	0,02	0,02
2	1,824	26,44	32,03	1,08	1,09
4	2,508	2,14	34,49	11,17	14,40
8	4,198	17,44	53,73	1,36	18,64
12	4,737	3,42	61,89	6,88	30,37
14	5,018	0,09	62,28	16,45	49,31
18	5,445	4,92	69,83	0,57	50,12
22	6,057	0,27	70,74	11,59	65,18
30	7,052	0,02	71,46	0,10	66,39
100	15,768	0,02	86,48	0,11	84,42

In X si osserva come i modi di vibrare che presentano percentuali di massa partecipante che superano il 5% sono il modo 1, il modo 2 e il modo 8.

In Y, invece, i modi di vibrare la cui massa partecipante supera il 5% corrispondono al modo 4, modo 12, modo 14 e modo 22.

Le immagini presenti in Tabella 29, relative ai modi di vibrare più significativi presenti in Tabella 28, riassumono il comportamento della struttura nelle due diverse direzioni.

Tabella 29 - Analisi modale, DtXYZ



8.5 ANALISI NON LINEARE

Per valutare il comportamento non lineare dell'edificio viene implementata un'analisi statica non lineare.

L'analisi statica non lineare è una procedura impiegata per determinare il comportamento di una struttura a fronte di una determinata azione (forza o spostamento) applicata. Essa consiste nello "spingere" la struttura fino a che questa collassa o un parametro di controllo di deformazione non raggiunge un valore limite prefissato. La "spinta" si ottiene applicando in modo incrementale monotono un profilo di forze o di spostamenti prestabilito. In sostanza l'analisi *pushover* è una tecnica di soluzione incrementale-iterativa delle equazioni di equilibrio statico della struttura in cui la forzante è rappresentata dal sistema di spostamenti o forze applicato.

Il primo risultato di un'analisi di *pushover* è la definizione della *curva di capacità* della struttura ossia della curva forza-spostamento che rappresenta la capacità esibita dal sistema a fronteggiare una certa azione esterna.

Con lo scopo di determinare il comportamento non lineare della Basilica di San Benedetto vengono analizzate entrambe le direzioni, X e Y, in entrambi i versi. Prima di analizzare nello specifico i risultati emersi è doveroso spiegare le strategie di soluzione scelte ed eseguire alcune analisi di sensitività.

Il processo di risoluzione dell'analisi statica non lineare è definito da diverse opzioni e metodologie e che devono essere tenute in considerazione al fine di ottenere risultati affidabili. Tra questi risultano importanti la definizione del criterio di convergenza, del metodo di iterazione, il numero di iterazioni, i passi dimensionali e la tolleranza. Al fine di ottenere la convergenza nelle diverse analisi che sono state eseguite sono stati utilizzati dei valori diversi.

All'interno dell'ambiente DIANA FEA_{BV} è stata eseguita un'analisi *structural nonlinear*. Come prima operazione, all'interno di questa analisi, sono stati inseriti due *execute block*: uno per l'applicazione del peso proprio della struttura, senza suddivisione in *steps* e il secondo per rappresentare la forza sismica. Questa è stata suddivisa in *steps*, fissando il numero massimo di iterazioni a 200.

Per determinare l'equilibrio tra i vettori delle forze esterne ed interne in seguito ad un incremento di carico si utilizza una procedura iterativa incrementale. Il metodo scelto è *Secant Quasi-Newton* (Figura 231) che, diversamente dal *Regular Newton-Raphson*, non calcola completamente una nuova matrice di rigidezza ad ogni iterazione ma, nei passi successivi, utilizza la matrice di rigidezza secante (più rapida da calcolare) [DIANA FEA_{BV} 2020] Il criterio di convergenza scelto è quello dell'energia, con una tolleranza di 0,01. Inoltre, si è fatto uso dell'algoritmo *line search*.

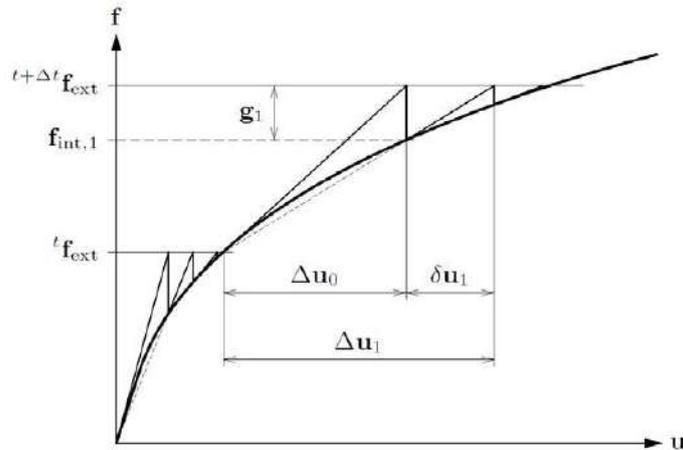


Figura 231 - Metodo Secant (Quasi-Newton)
[DIANA FEA BV 2020]

È possibile, nell'esecuzione dell'analisi, che l'incremento di carico diventi negativo e per questo motivo si è utilizzato l'*arch length control* per adattarne la dimensione all'interno del processo iterativo e trovare quindi dei risultati post picco che altrimenti non potrebbero essere trovati.

8.5.1 Analisi di sensitività

Il parametro che maggiormente influenza l'analisi lineare, riguardo alle proprietà del materiale, è l'energia di frattura a trazione (G_f). Valori bassi di questo parametro generano più problemi nella convergenza mentre valori più alti forniscono processi di convergenza più stabili ma risultati meno conservativi. Per capire come questo parametro influenzi l'analisi viene svolta un'analisi di sensitività modificando il valore ottenuto da letteratura che, come spiegato al paragrafo 8.2.2, risulta essere di 1,276 N/m. Questo valore è stato considerato 10 volte maggiore e poi raddoppiato.

Nei grafici mostrati da Figura 232 a Figura 235 si possono osservare i confronti tra le curve di capacità di tutti i quattro punti di controllo presi in considerazione nel modello della Basilica di San Benedetto.

Nel grafico in Figura 236, invece, vengono inserite tutte le curve confrontandone i valori. Si è potuto osservare che per piccole differenze dell'energia di frattura a trazione G_f i risultati sono confrontabili, mentre nel momento in cui essa viene moltiplicata per 10 e raddoppiata presenta dei valori di accelerazione molto più elevati. In seguito a questa analisi, si è visto quindi come il parametro non influenzi in modo significativo l'analisi. Si è scelto di tenere valido, dunque, il valore di calcolo dell'energia di frattura a trazione.

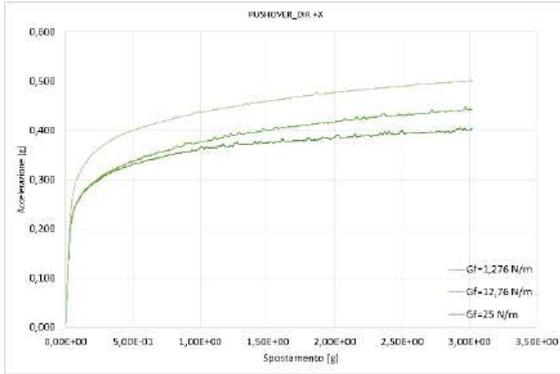


Figura 232 – Confronto curve di capacità con diversi valori di energia: campanile

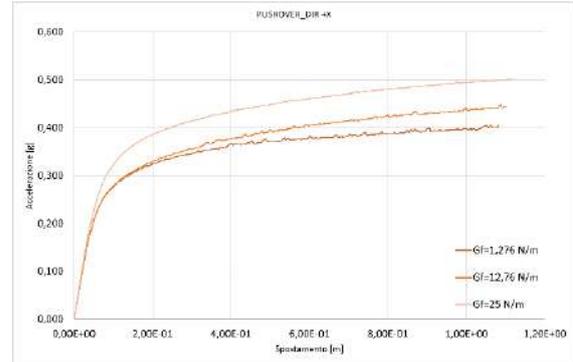


Figura 234 – Confronto curve di capacità con diversi valori di energia: navata sinistra

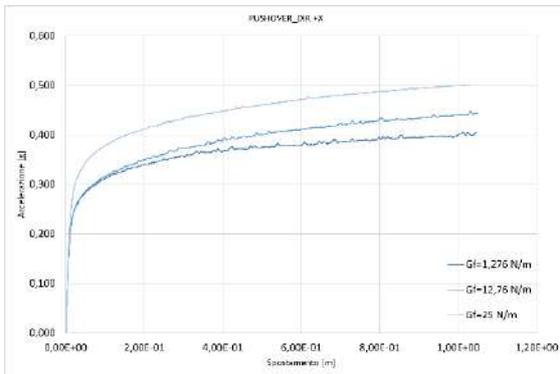


Figura 233 - Confronto curve di capacità con diversi valori di energia: facciata

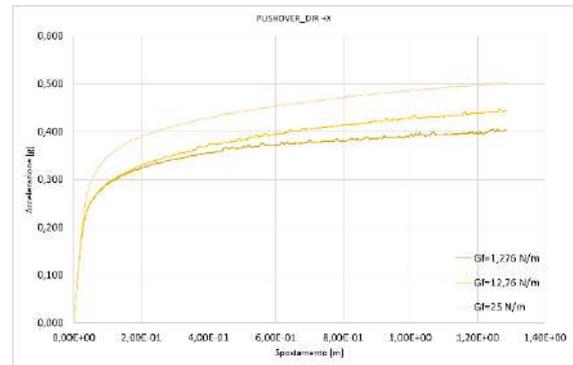


Figura 235 - Confronto curve di capacità con diversi valori di energia: navata destra

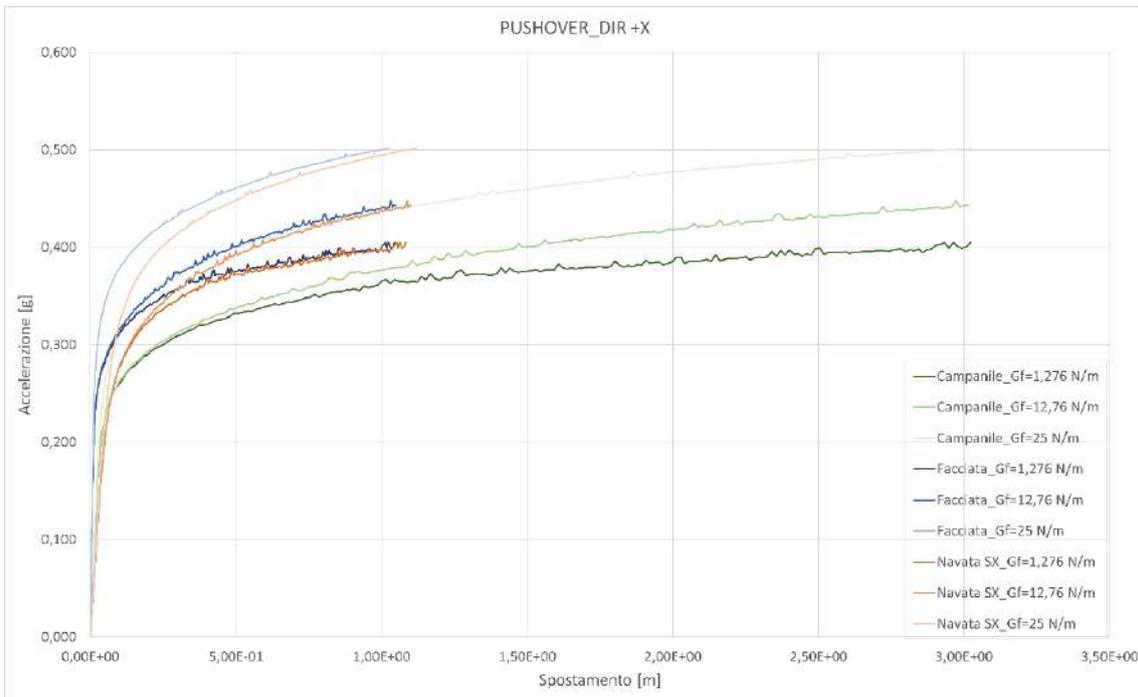


Figura 236 - Confronto curve di capacità con diversi valori di energia: campanile, facciata e navata sinistra

8.5.2 Risultati modello

Nei seguenti paragrafi vengono analizzati i risultati nelle 4 direzioni, +X, +Y, -X e -Y. Per tracciare le curve di capacità sono stati scelti alcuni punti di controllo: uno in facciata, uno nella navata sinistra e, in corrispondenza, nella navata destra e uno in sommità del campanile (Figura 237). In questo modo si sono considerati gli spostamenti più significativi di ciascun macroelemento dell'edificio.

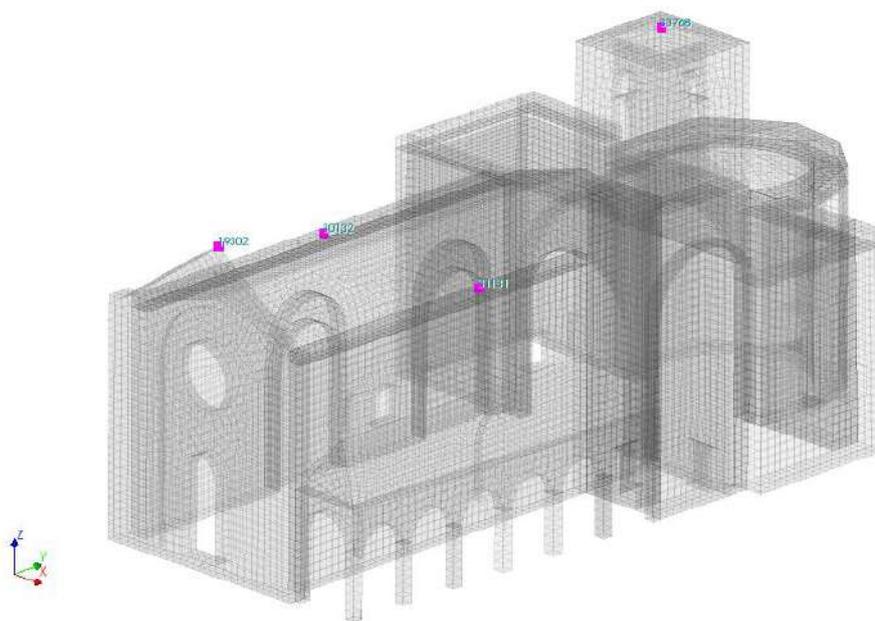


Figura 237 - Localizzazione punti di controllo

Pushover direzione +X:

Il primo caso analizzato è la direzione +X. In Figura 238 si può osservare la curva di capacità relativa ai quattro punti di controllo presi come riferimento. Si può notare come tutte le quattro curve abbiano un tratto elastico lineare per piccoli spostamenti fino ad accelerazioni di circa 0,25g e come si raggiunga il *plateau* per accelerazioni di circa 0,4g. Dall'analisi emergono spostamenti maggiori nel campanile, come è possibile osservare anche da Figura 239.

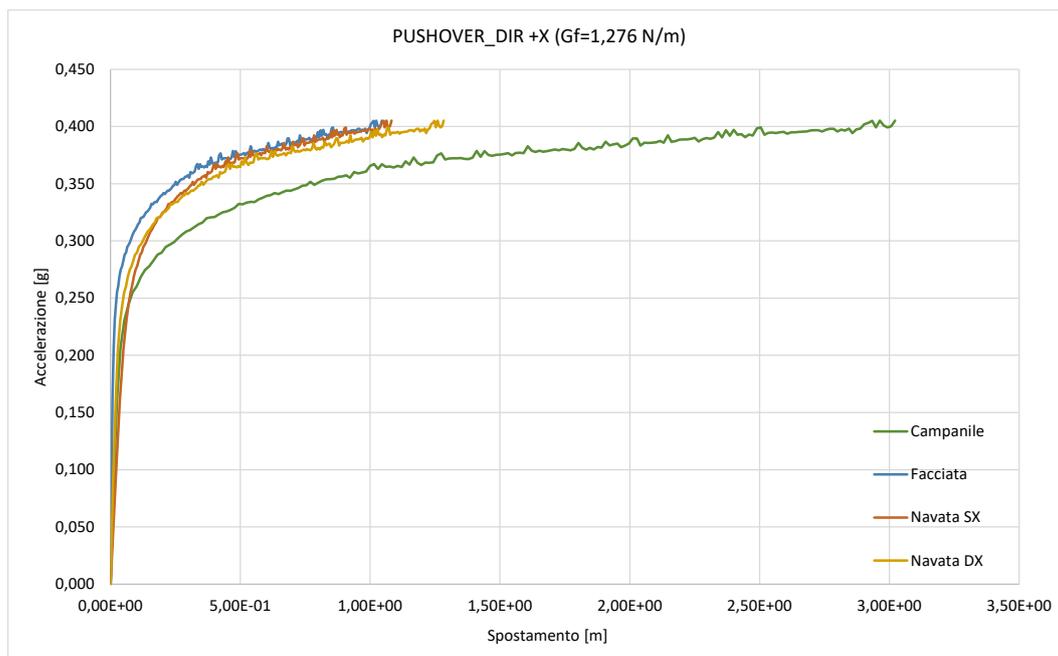


Figura 238 - Curve di capacità, Pushover dir +X

Pushover dir +X
Load step 90, Load factor 0.45224
Displacements (DtX)

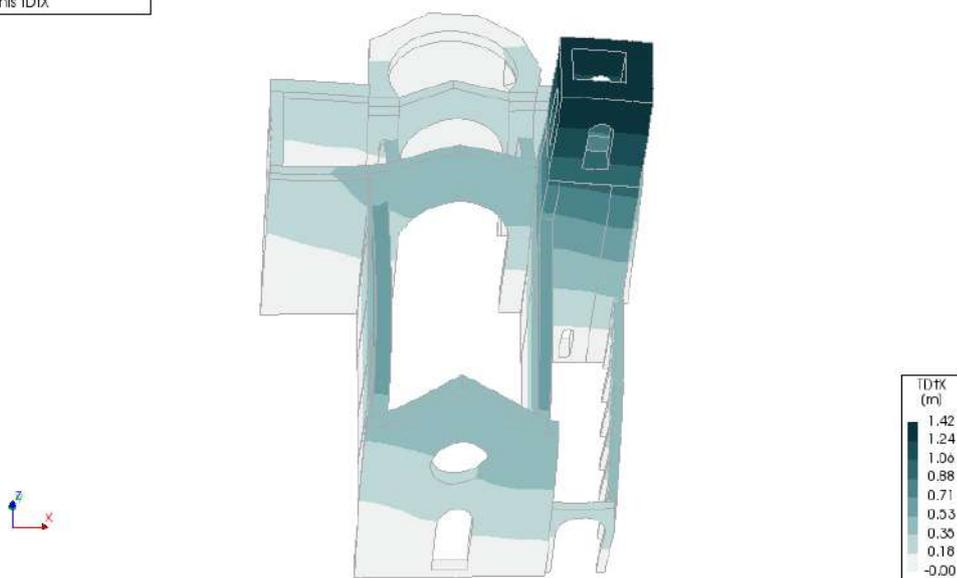


Figura 239 - Spostamenti (DtX) Step 40

Di notevole importanza risulta l'osservazione delle deformazioni principali di trazione (*Strains E1*), in cui è possibile valutare le rotture a trazione, relative quindi ad uno stato di fessurazione. In modo particolare, in Figura 240, si può osservare l'evoluzione del fenomeno di rottura della Basilica se sollecitato da un'accelerazione in direzione +X.

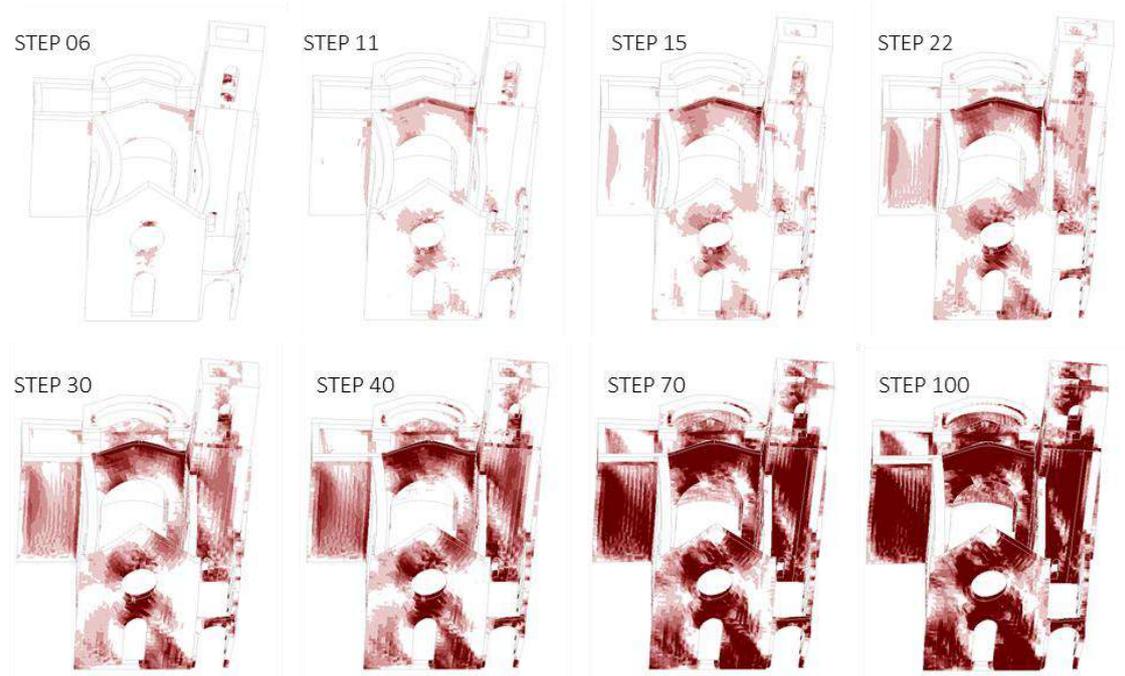
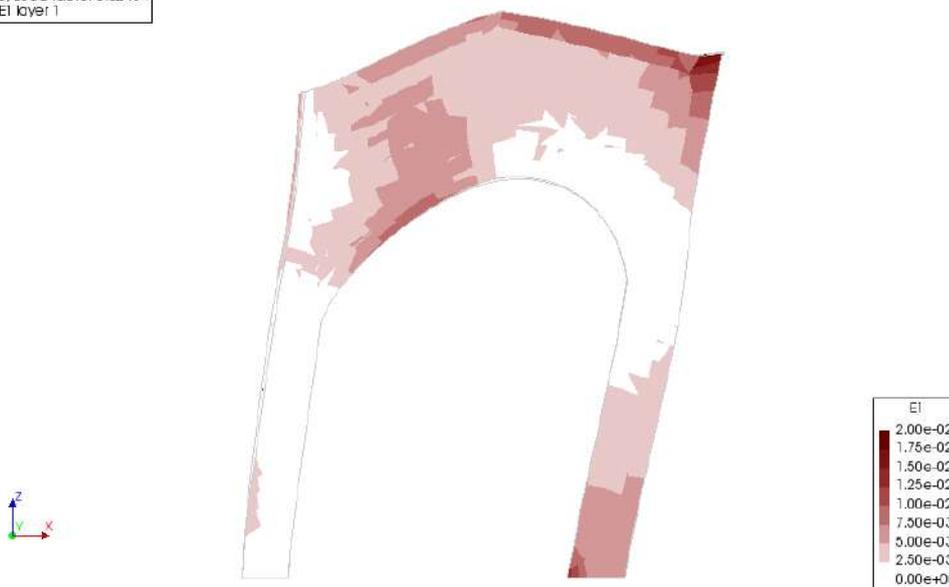


Figura 240 - Pushover dir. +X, Strains E1

Dall'osservazione tensioni principali si evidenzia, innanzitutto, l'attivazione del meccanismo dell'arco trionfale che nei primi *step* presenta già dei fenomeni di trazione nella parte adiacente al campanile fino ad arrivare alla sua rottura negli *step* successivi.

Pushover dir +X
Load step 15, Load factor 0.32434
Total Strain E1 layer 1



Per quanto riguarda la facciata, invece, si può notare che avviene la rottura a taglio (Figura 241). Dal quadro fessurativo studiato a seguito del sisma del 2016 si evidenzia la corrispondenza della presenza di un meccanismo nel piano della facciata con la formazione di una fessurazione a croce

al centro della facciata. Sempre da Figura 241, è possibile osservare come anche il campanile presenti delle lesioni assimilabili a quelle formatesi a seguito del sisma.

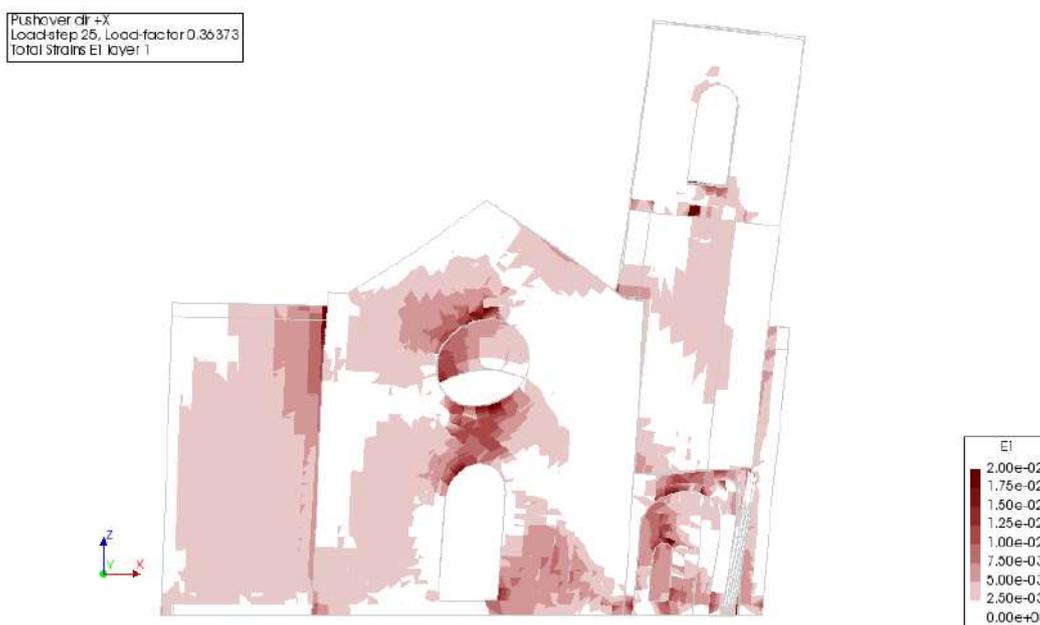


Figura 241 - Pushover dir. +X, Strains E1, step 25

Pushover direzione -X:

Eseguendo l'analisi statica nel verso opposto (direzione -X) si nota un comportamento del tutto simile e specchiato. In Figura 242 si può osservare come questa volta il *plateau* si raggiunge per un'accelerazione tra i 0,4g e 0,5g. Anche in questo caso gli spostamenti maggiori si verificano in corrispondenza del campanile (Figura 243).

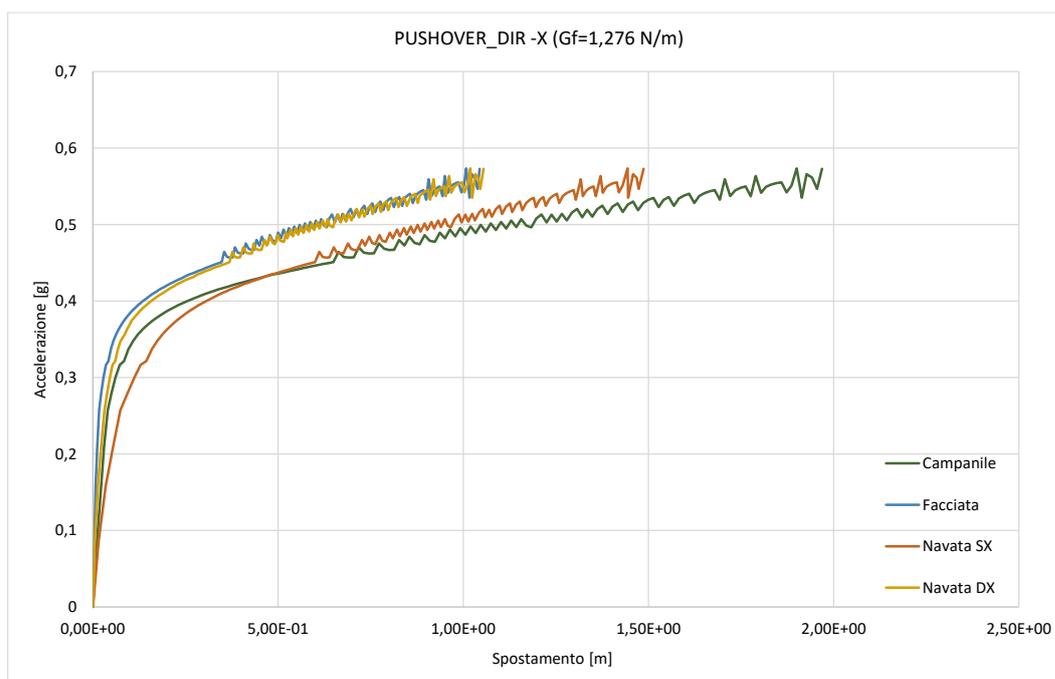


Figura 242 - Curve di capacità, Pushover dir -X

Pushover dir.-X
Load step 90, Load factor 0.49643
Displacements DTX

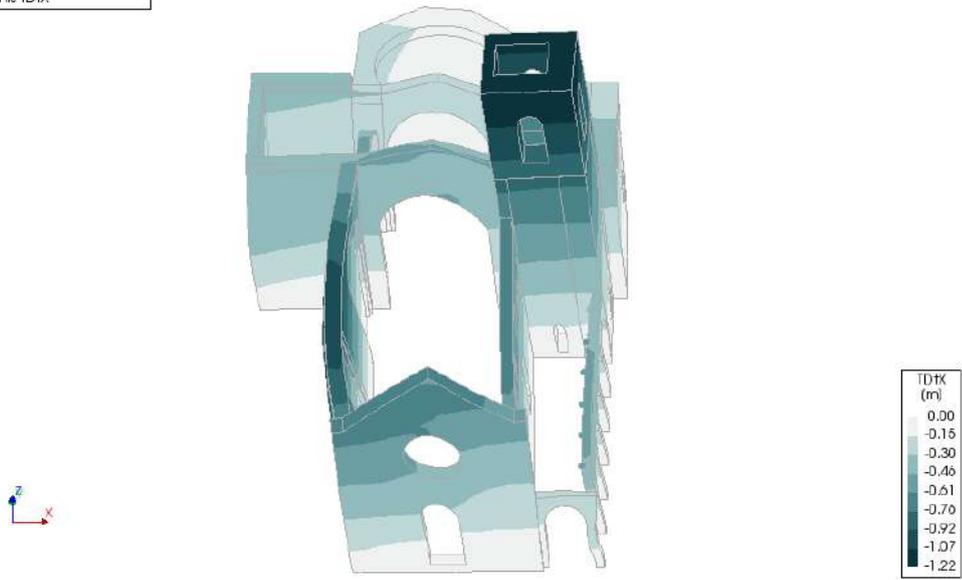


Figura 243 - Spostamenti, DTX, step 90

Dall'osservazione degli *Strains E1* in Figura 244 si può studiare l'evoluzione del fenomeno di rottura della Basilica se sollecitato da un'accelerazione in direzione -X.

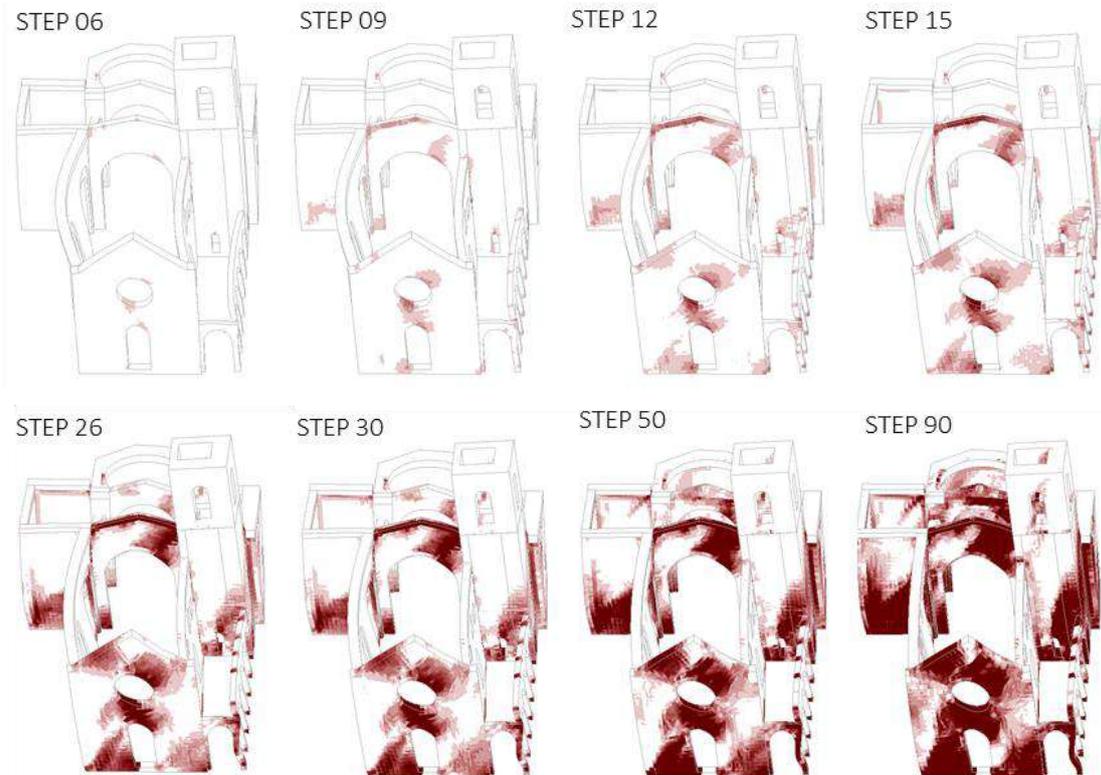


Figura 244 - Pushover dir. -X, Strains E1

In Figura 244 si evidenziano tutti i fenomeni analizzati già nel caso di *pushover* in direzione +X ma, in questo caso, nel verso opposto. Quindi, ad esempio, si può notare la rottura a taglio in facciata che questa volta si estende a destra a sinistra (Figura 245), evidenziando la rottura a croce verificatasi a seguito del sisma.

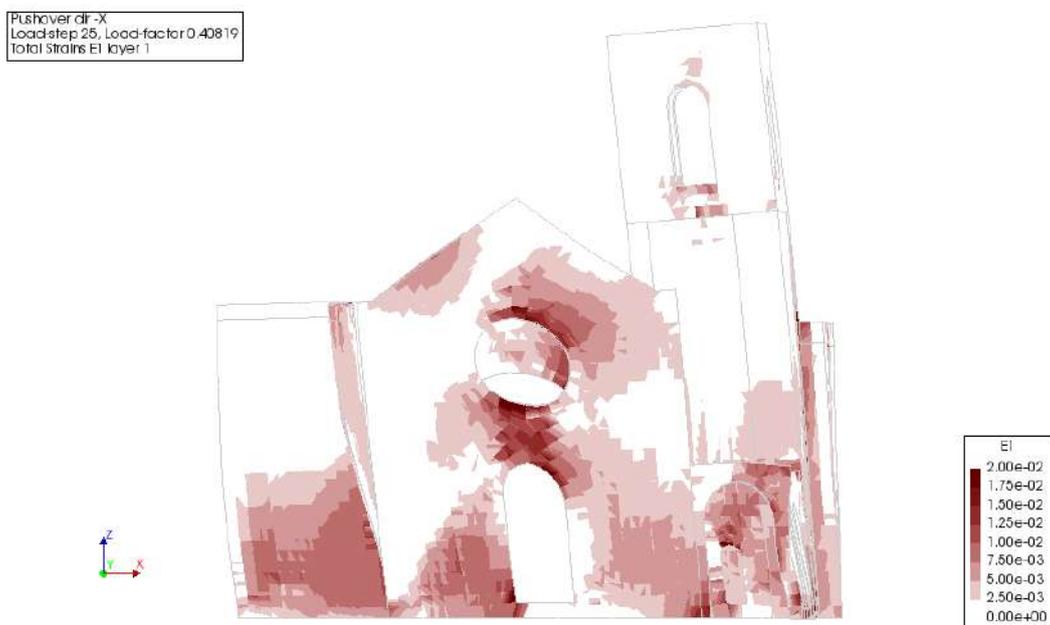


Figura 245 - Pushover dir. -X, Strains E1, step 25

Pushover direzione +Y:

Protagonista dell'analisi *pushover* in direzione +Y è il campanile che, come osservabile dalle curve di capacità dei punti di controllo presi a riferimento (Figura 246), mostra spostamenti nettamente maggiori rispetto alla facciata e alle pareti delle due navate.

Si può osservare come per il campanile si abbia un tratto elastico lineare per piccoli spostamenti fino ad accelerazioni di circa 0,4g, mentre per le due pareti della navata e per la facciata sia leggermente più alto, fino ad accelerazioni di 0,45g. Il *plateau*, per quanto concerne il campanile, si raggiunge per accelerazioni tra 0,5g e 0,6g.

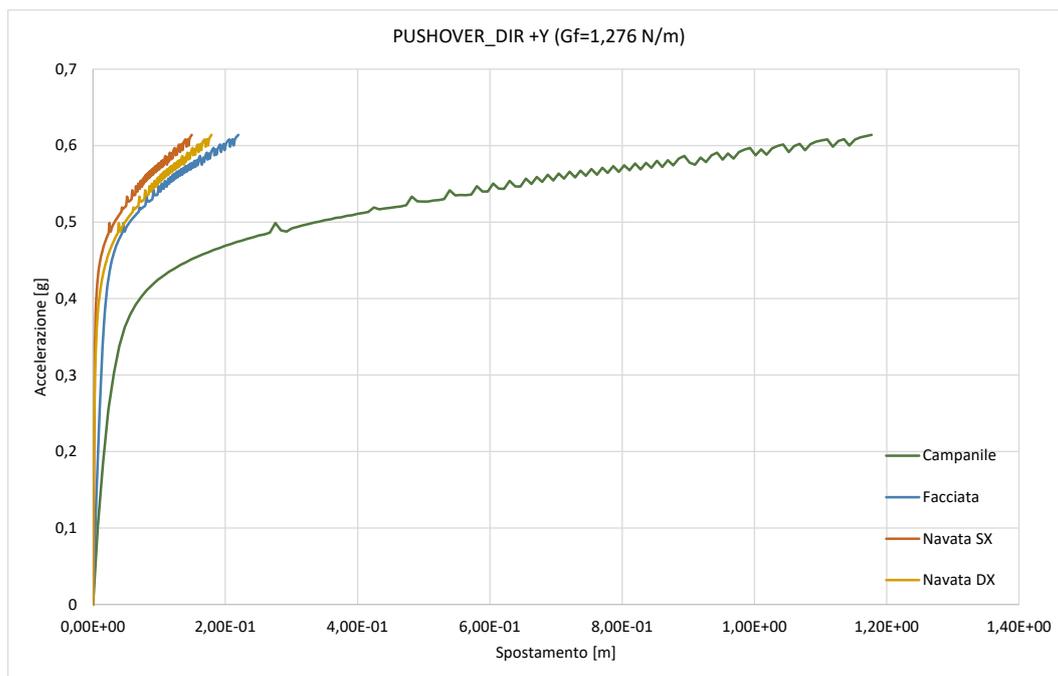


Figura 246 - Curve di capacità, Pushover dir +Y

In Figura 247 si può osservare dove sono concentrati i maggiori spostamenti. Essi coinvolgono la sommità del campanile e, essendo un modello non lineare al continuo, questo comporta spostamenti anche nella parete adiacente della navata e del transetto e, conseguentemente, dell'abside.

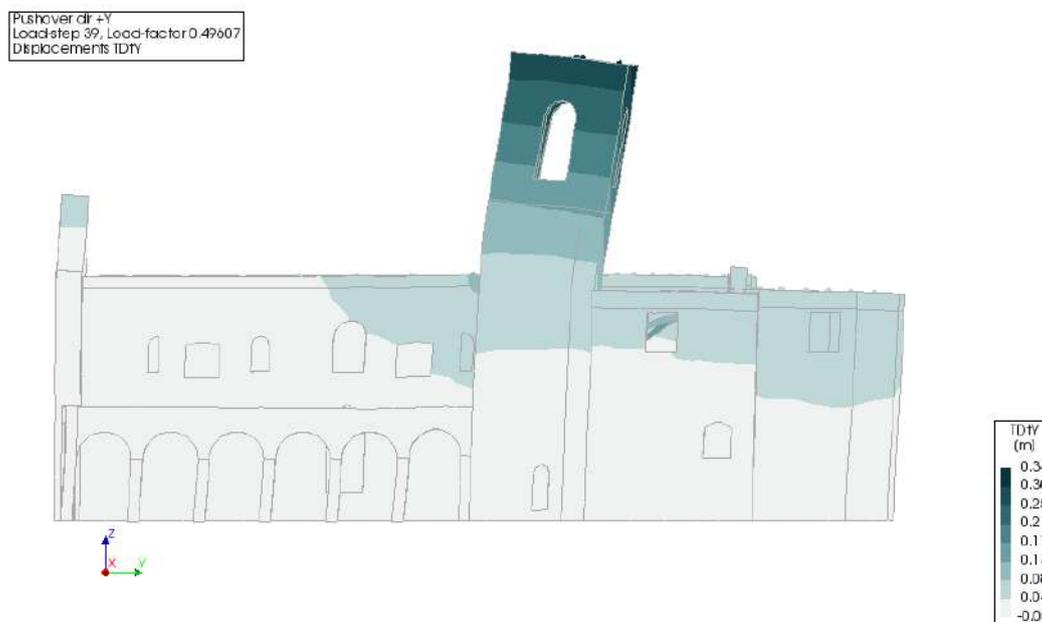


Figura 247 - Spostamenti, DtY, step 39

Dall'osservazione degli *Strains E1* in Figura 248 si può osservare l'evoluzione del fenomeno di rottura della Basilica se sollecitato da un'accelerazione in direzione +Y.

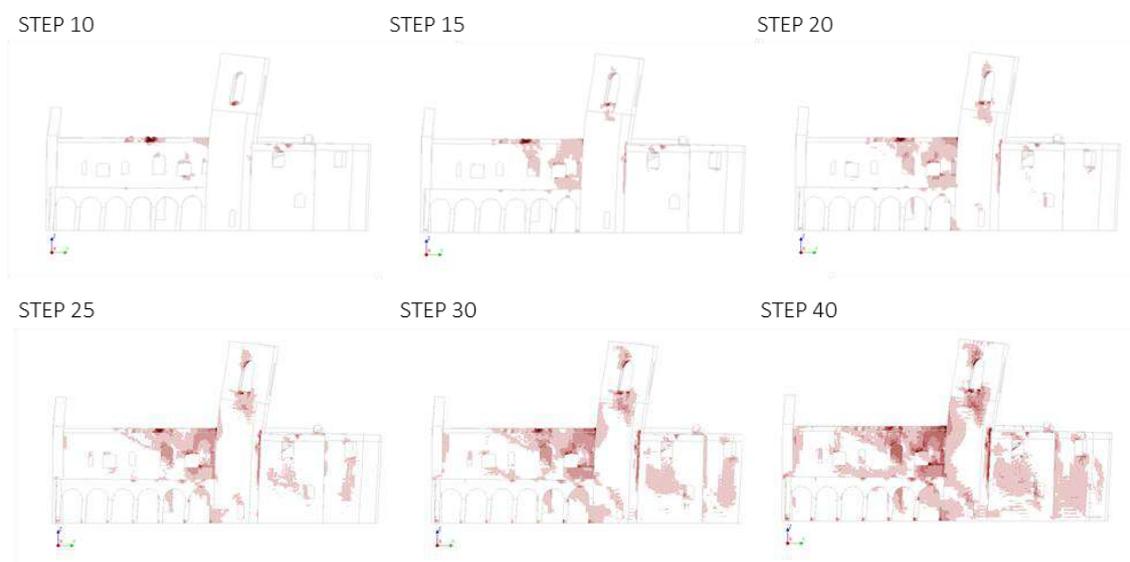


Figura 248 - Pushover dir. +Y, Strains E1

Analizzando l'evoluzione del danno nel dettaglio si può osservare innanzitutto la rottura del campanile nell'angolo con il transetto, che si fa sempre più marcata con l'avanzare degli *step* di carico. Allo stesso modo si possono osservare delle fessurazioni nella parete visibile del transetto e dell'abside.

Tra i meccanismi che si possono evidenziare dall'analisi dei risultati del modello emerge la rotazione della parte sommitale del campanile, come si può osservare da Figura 249. Questo meccanismo è probabilmente dovuto alla diversità di rigidità tra il muro del transetto destro dove poggia il campanile e la volta in laterocemento del transetto che non presenta un vero e proprio arco trionfale strutturale. L'interno del transetto, quindi, ha una rigidità minore rispetto all'esterno, comportando una rotazione del campanile verso questo lato.

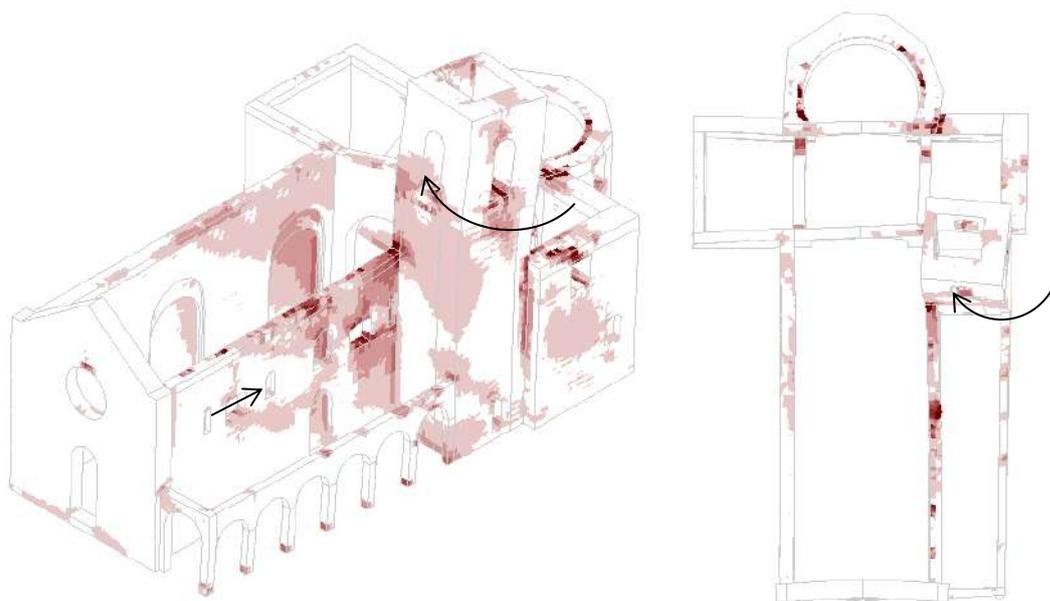


Figura 249 – Pushover dir +Y, Individuazione meccanismi di danno

Pushover direzione -Y:

Anche per la *pushover* in direzione -Y, come nel caso precedente, è il campanile a subire i maggiori spostamenti e, conseguentemente, le maggiori rotture. Dal confronto con le curve di capacità dei punti di controllo presi a riferimento (Figura 250) si notano, infatti, maggiori spostamenti rispetto alla facciata e alle pareti delle due navate. Si può osservare come per il campanile si abbia un tratto elastico lineare per piccoli spostamenti fino ad accelerazioni di circa 0,35g, mentre per le due pareti della navata e per la facciata il tratto lineare sia leggermente più alto, fino ad accelerazioni di 0,45g. Il *plateau* si raggiunge per accelerazioni tra 0,5g e 0,6g.

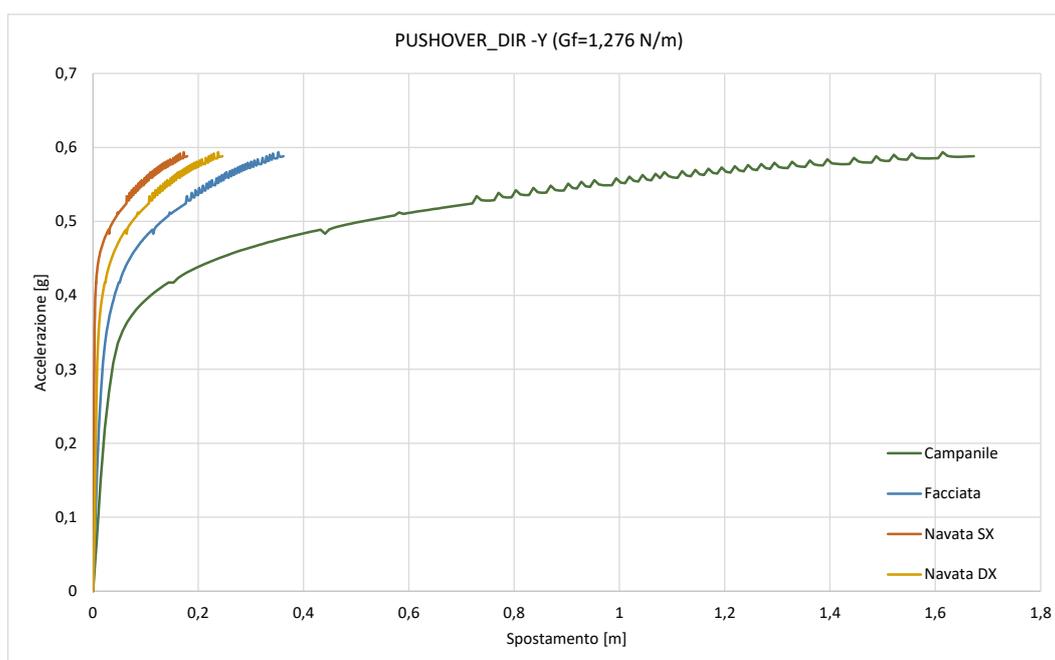


Figura 250 - Curve di capacità, Pushover dir -Y

In Figura 251 si può osservare che gli spostamenti maggiori sono concentrati nella sommità del campanile che provoca conseguenti spostamenti anche nelle pareti adiacenti della navata e in facciata.



Figura 251 - Spostamenti, DtY, step 40

Dall'osservazione delle deformazioni principali di trazione in Figura 252 si può studiare l'evoluzione del fenomeno di rottura della Basilica se sollecitato da un'accelerazione in direzione -Y.

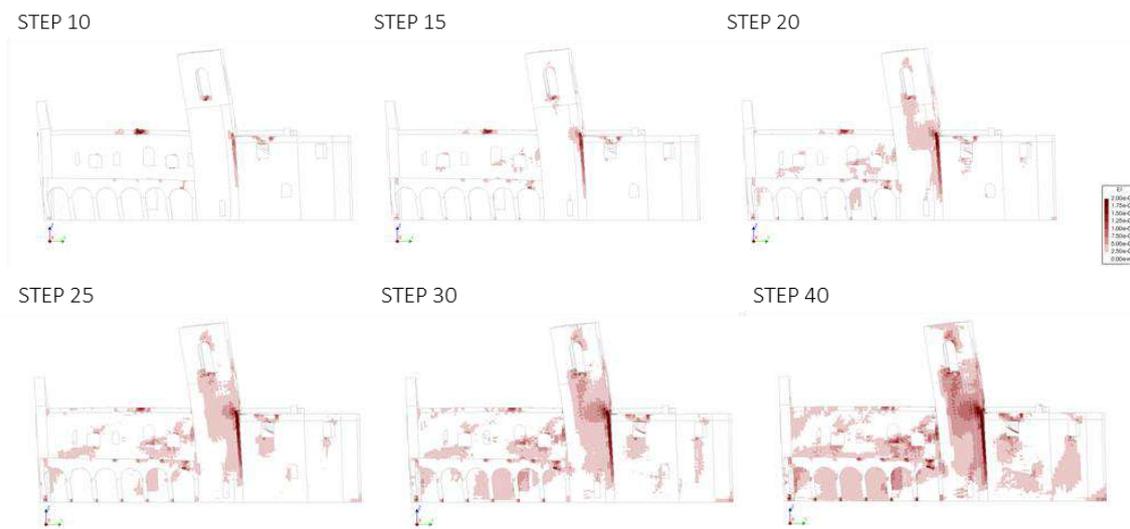


Figura 252 - Pushover dir. -Y, Strains E1

Risulta di fondamentale importanza, anche in questo caso, osservare la rottura che si verifica nell'angolo tra la muratura del campanile e del transetto. In questa analisi, però, la rottura del

campanile avviene per ragioni diverse rispetto al caso precedente: il campanile, infatti, sembra "strapparsi" dalla muratura del transetto, provocando diverse fessurazioni anche nella parete della navata (Figura 253).



Figura 253 - Pushover dir -Y, Individuazione meccanismi di danno

8.5.3 Valutazione vulnerabilità degli elementi

Al fine di valutare quali sono gli elementi più vulnerabili all'interno della Basilica di San Benedetto è stata condotta un'analisi non lineare *pushover* su un altro modello. Il modello in questione è privo di coperture e quindi non si è studiato un comportamento globale della struttura ma comportamenti locali dei singoli elementi, che hanno permesso quindi una valutazione della loro vulnerabilità al sisma.

Sono state condotte analisi in diverse direzioni. Innanzitutto, è opportuno analizzare l'analisi *pushover* in direzione +X. In questo caso, come si può osservare in Figura 254, il primo elemento ad arrivare a rottura e che determina l'interruzione dell'analisi è il Portico delle Misure. Il Portico delle Misure risulta infatti essere un elemento molto snello, che risente di grandi spostamenti (Figura 255).

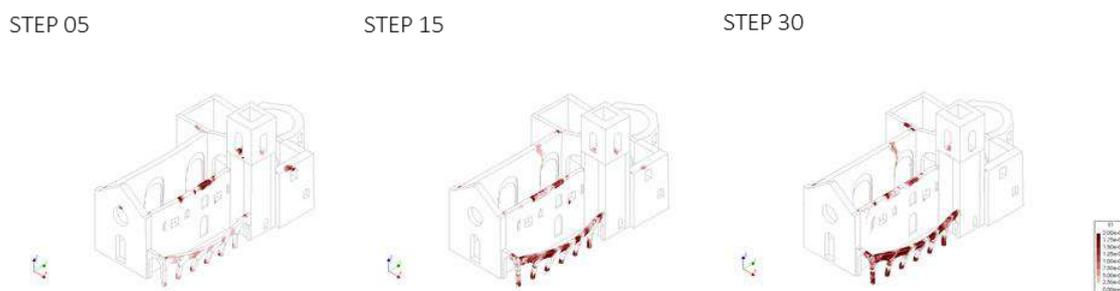


Figura 254 - Pushover dir +X, Strains E1, modello senza coperture

PUSHOVER dir +X
 Load step 30, Load factor 0.11012
 Displacements: DTX
 min: -0.017m max: 2.4m

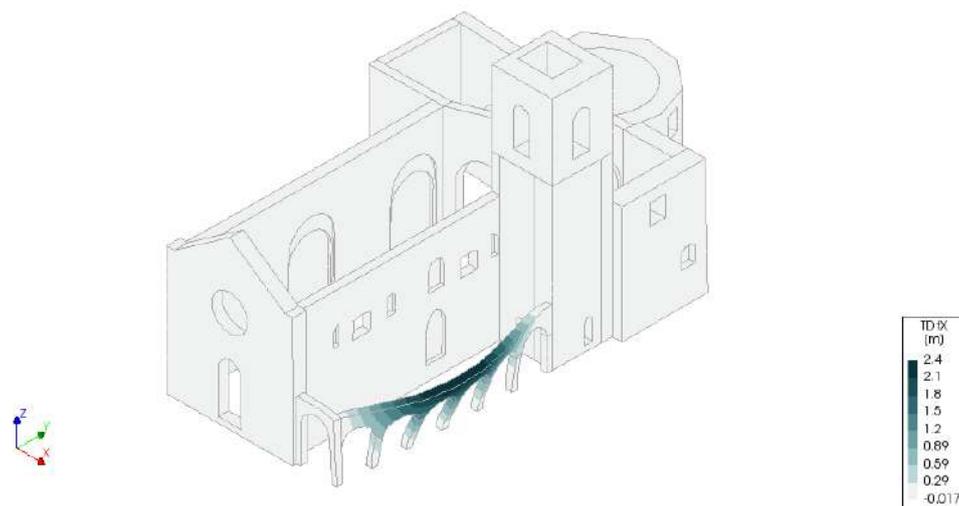


Figura 255 - Spostamenti, DTX, step 30, modello senza coperture

Analizzando le curve di capacità dei punti di controllo presi a riferimento anche per le precedenti analisi e, in aggiunta, di un punto preso in mezzeria del Portico delle Misure (Figura 256), si può osservare come il campanile abbia spostamenti molto maggiori rispetto agli altri elementi e che si raggiunga il *plateau* per accelerazioni di 0,11g.

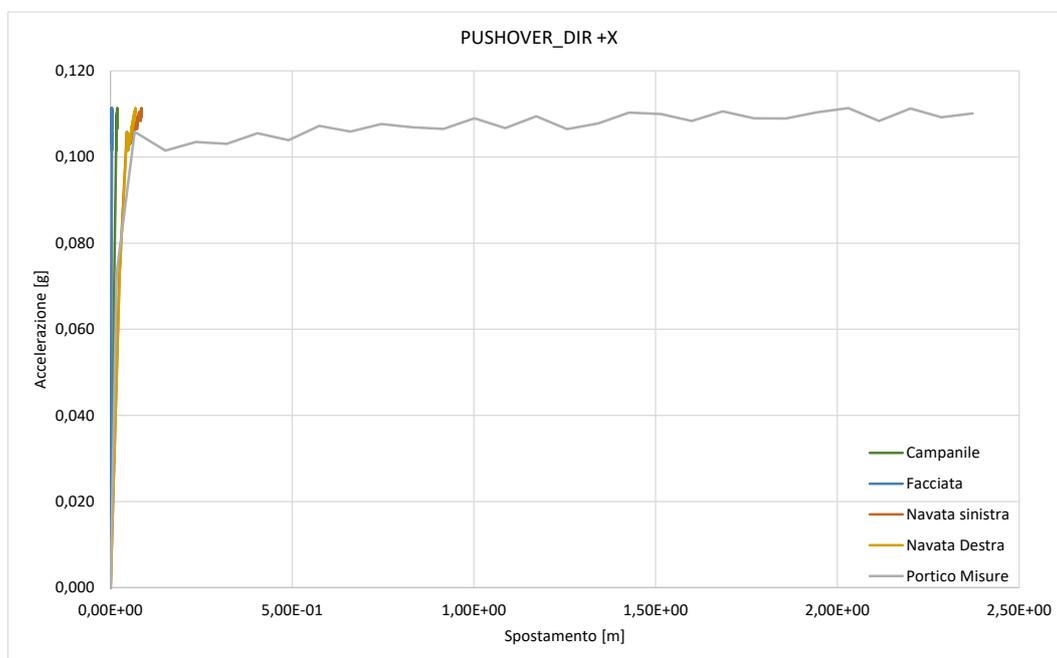


Figura 256 - Curve di capacità, Pushover dir +X, modello senza coperture

Si è proceduto, quindi, con il calcolo del coefficiente di collasso per un *cinematismo di ribaltamento globale di facciata fuori piano* per quanto riguarda il Portico delle Misure.

Dopo aver valutato, la sommatoria dei pesi della muratura (sono stati trascurati i pesi della copertura) e delle spinte orizzontali, il valore ottenuto del coefficiente λ risulta essere pari a:

$$\lambda = \frac{\sum P_i b_i}{\sum P_i h_i} = \frac{156,03}{1584,30} = 0,10$$

Il valore del coefficiente di attivazione del meccanismo è molto vicino al valore per cui avviene la rottura in DIANA FEA_{BV}, pari a 0,11, quindi con ottimi risultati.

Una volta individuato l'elemento più vulnerabile all'azione sismica in direzione +X si procede con l'individuazione del secondo elemento più vulnerabile. Per far ciò, quindi, si esegue un'ulteriore analisi con un modello "aggiornato". Nel modello, in questo caso, viene eliminato il Portico delle Misure, che abbiamo visto raggiungere la rottura dopo pochi step e quindi interrompere l'avanzamento dell'analisi.

Si è proceduto, quindi, svolgendo su questo modello un'analisi *pushover* in direzione +X. In questo caso, come si può osservare in Figura 257, il primo elemento ad arrivare a rottura è la parete sinistra della navata.

Anche in questo caso, osservando gli spostamenti *DtX* (Figura 258) e il confronto tra le curve di capacità dei punti di controllo (Figura 259), si nota come sia proprio la navata sinistra ad avere spostamenti maggiori.

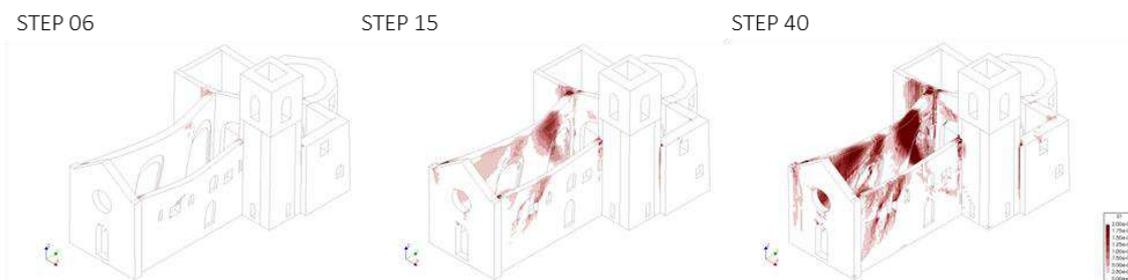


Figura 257 - Pushover dir +X, Strains E1, modello senza coperture e senza portico

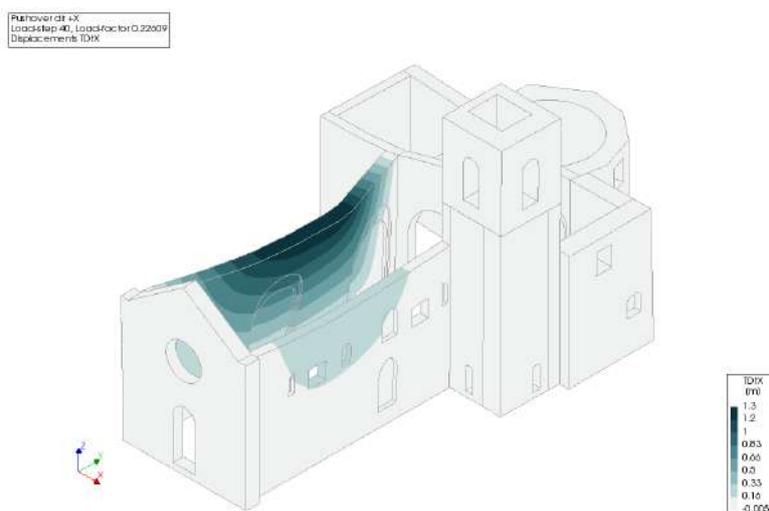


Figura 258 - Spostamenti, DtX, step 40, modello senza coperture e senza portico

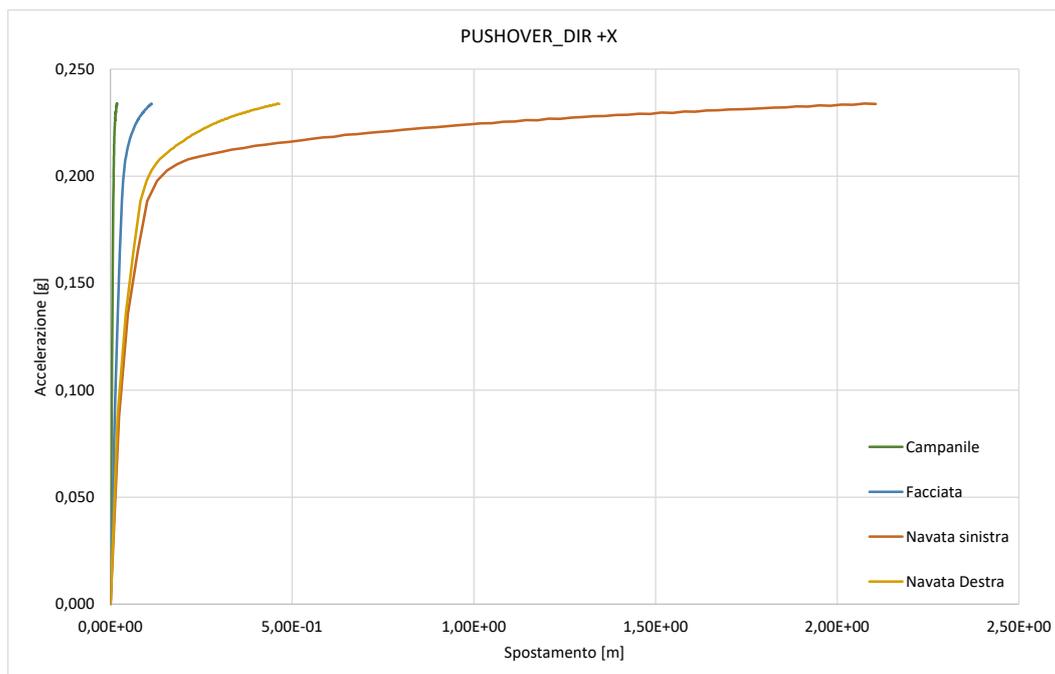


Figura 259 - Curve di capacità, Pushover dir +X, modello senza coperture e senza portico

Eseguendo, come nel caso precedente, il calcolo del coefficiente di attivazione del meccanismo di ribaltamento semplice di parete fuori piano si ottiene un valore pari a:

$$\lambda = \frac{\sum P_i b_i}{\sum P_i h_i} = \frac{5644,09}{66125,24} = 0,086$$

Valutando, però, i risultati emersi dal modello e la reale situazione di danno della parete si può osservare che nella realtà non si è verificato un vero e proprio ribaltamento fuori piano della parete, ma l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete e quindi la formazione di cerniere cilindriche oblique e verticali per azioni fuori dal piano. Per questa ragione si è ritenuto opportuno fare il calcolo di un cinematismo diverso, ovvero quello di *flessione orizzontale di parete* (si veda eq. (25) al §2.7.2).

Trascurando anche in questo caso i carichi delle coperture e considerando la rottura in mezzeria della parete ($L_1=L_2$), si ottiene un valore del cinematismo di collasso λ pari a:

$$\lambda = 0,12$$

Si può osservare come, in questo caso, il valore sia più alto e dunque più vicino al valore per cui avviene la rottura in DIANA FEA_{BV}, pari a circa 0,2. Quest'ultimo valore appare comunque più alto in quanto risente del confinamento laterale della parete.

Le stesse operazioni sono state eseguite per l'analisi statica in direzione +Y. In Figura 260 è possibile osservare le deformazioni di trazione (*Strains E1*) del modello senza coperture e in Figura 261 quelli del modello anche senza Portico delle Misure.

Pushover dir +Y
Load step 40, Load-factor 0.37149
Total Strain E1

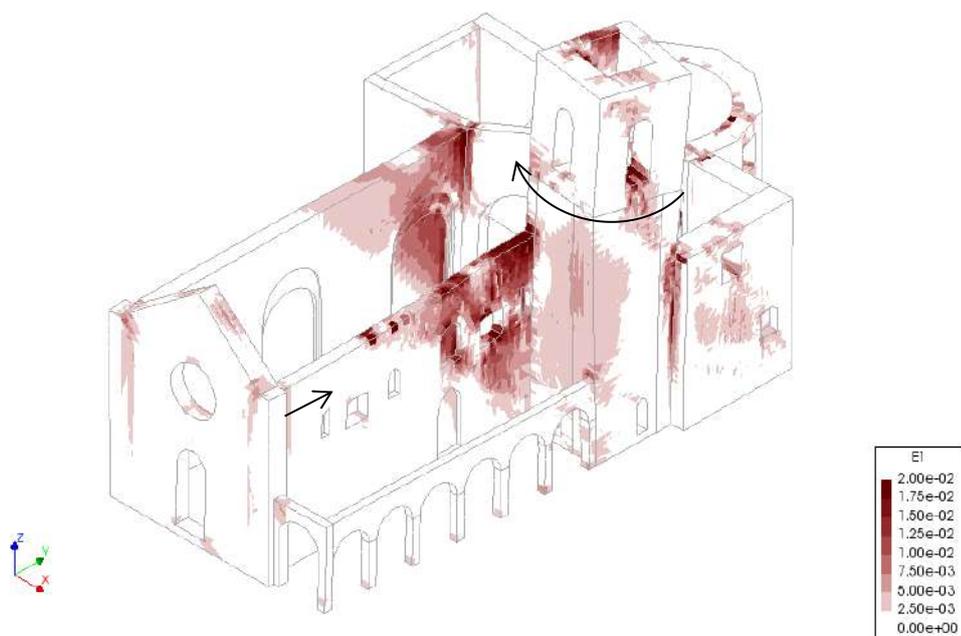


Figura 260 - Pushover dir +Y, Strains E1, modello senza coperture

Pushover dir +Y
Load step 35, Load-factor 0.37913
Total Strain E1

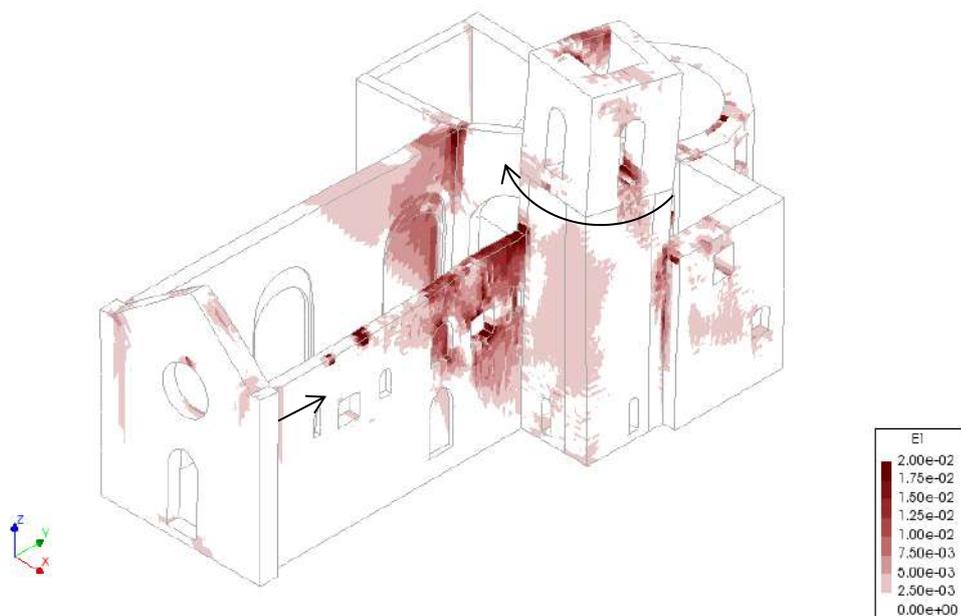


Figura 261 - Pushover dir +Y, Strains E1, modello senza coperture e senza portico

Si può osservare come, in questo caso, la parte più lesionata sia in corrispondenza del campanile, come si era potuto vedere per la *pushover* in direzione +Y e -Y illustrata al paragrafo 8.5.2. Si osserva, in entrambe le situazioni, il meccanismo di rotazione della parte sommitale del campanile. Importante, anche in questi due casi, la rottura che avviene in corrispondenza dell'angolo tra il campanile e il transetto destro. Emerge, più marcatamente nella situazione del modello senza coperture e senza Portico delle Misure, il fenomeno di rottura tra la facciata e le due navate laterali, conseguente alla formazione di tre cerniere plastiche. Esse sono due cerniere plastiche laterali in corrispondenza dello strappo con la navata e una al centro dove, a seguito di un'analisi in direzione contraria, ci si aspetta un meccanismo di rottura centrale della facciata, come è possibile osservare da Figura 262.

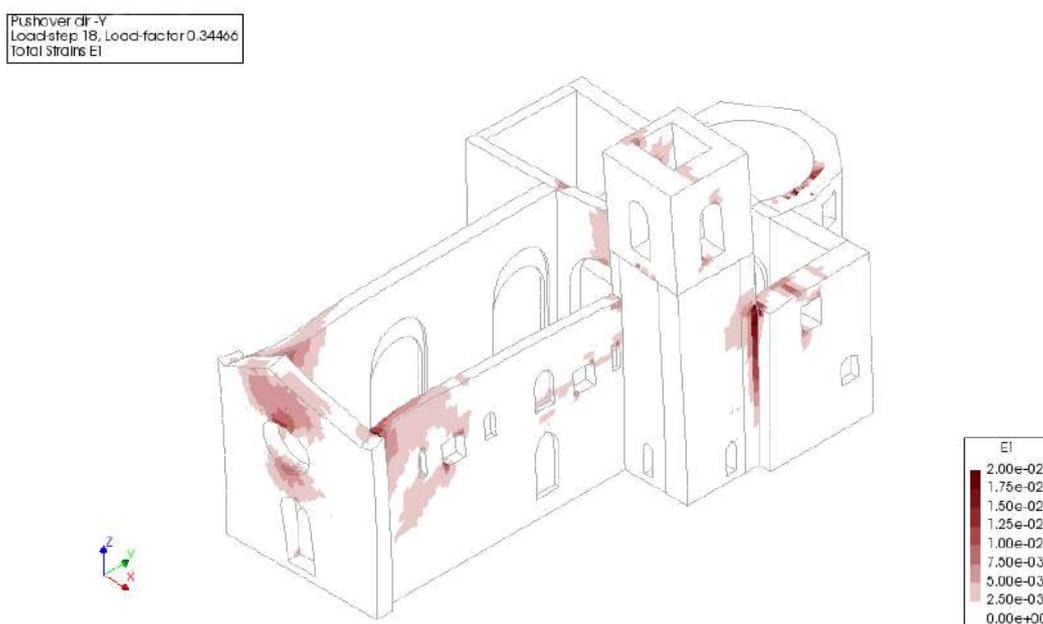


Figura 262 - Pushover dir -Y, Strains E1, modello senza coperture e senza portico

Ricordando che la Basilica di San Benedetto è stata costruita in diverse fasi storiche ed essendo il campanile e le navate laterali non appartenenti ad un'unica fase, non è corretto che ci sia un'influenza così elevata del campanile sulla navata laterale ad essa adiacente. Per questa ragione, dopo aver condotto tutte le analisi precedenti, si è ritenuto opportuno implementare delle modifiche al modello per studiare e potere verificare un comportamento quanto più assimilabile possibile alla realtà. Si è scelto, quindi, nella zona della navata immediatamente affiancata alla parete del campanile, di attribuire un modulo di elasticità della parete molto basso. Si è inserito, dunque, un valore pari a $E=100$ MPa. In questo modo si può osservare come le deformazioni siano nettamente maggiori in questa prima fascia individuata a contatto con il campanile e, invece, siano presenti danneggiamenti notevolmente più bassi nella parete della navata (Figura 263). In ogni caso i meccanismi che si possono individuare risultano essere gli stessi dei modelli analizzati precedentemente.

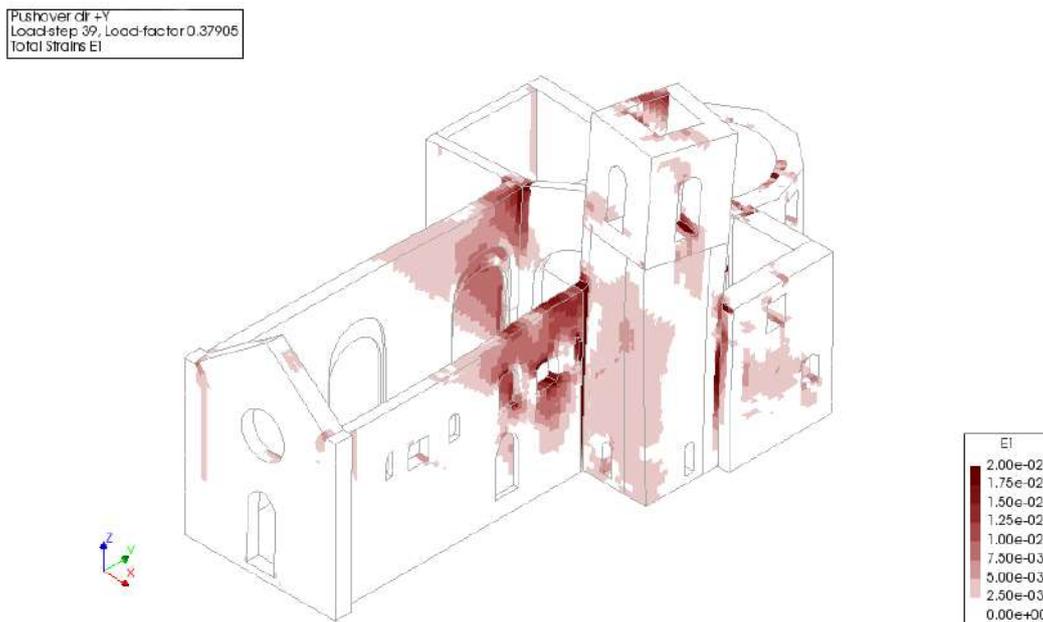


Figura 263 - Pushover dir +Y, Strains E1, discontinuità tra campanile e navata

8.5.4 Confronto risultati del modello con la realtà

Dall'analisi dei risultati del modello sono emersi diversi meccanismi del tutto confrontabili con la realtà di danno che si è verificata all'interno della Basilica di San Benedetto. È necessario sottolineare come tutti i meccanismi che si sono potuti osservare nei paragrafi precedenti che hanno evidenziato la rottura in punti localizzati della Basilica, siano il risultato di una sola analisi in un'unica direzione. Il sisma in una situazione reale, invece, non colpisce l'edificio in un'unica direzione. Gli effetti e i danni prodotti da un sisma, quindi, sono il frutto di una composizione di più azioni. Per questo motivo, quello che si vuole mostrare nei seguenti paragrafi è un riepilogo dei danni che si sono potuti osservare con il modello numerico realizzato in DIANA FEA_{BV} e la possibilità di una loro interpretazione e composizione al fine di potere essere paragonati a quanto effettivamente avvenuto nella realtà.

Innanzitutto, eseguendo l'analisi *pushover* in direzione +X, si può osservare il meccanismo di rottura a taglio della facciata. In modo particolare, svolgendo prima l'analisi *pushover* in direzione +X e successivamente in -X vediamo fenomeni di rottura che rispettivamente coinvolgono la facciata partendo dall'angolo alto a sinistra fino all'angolo basso a destra e viceversa. Questa situazione è visibile in Figura 264 per quanto riguarda la direzione +X e in Figura 265 per la direzione -X. La composizione di questi due fenomeni di rottura porta alla formazione di una lesione a croce al centro della facciata, che si rispecchia nell'effettivo quadro fessurativo individuato a seguito del sisma e visibile in Figura 266 e Figura 267.



Figura 264 - Pushover dir. +X, Strains E1

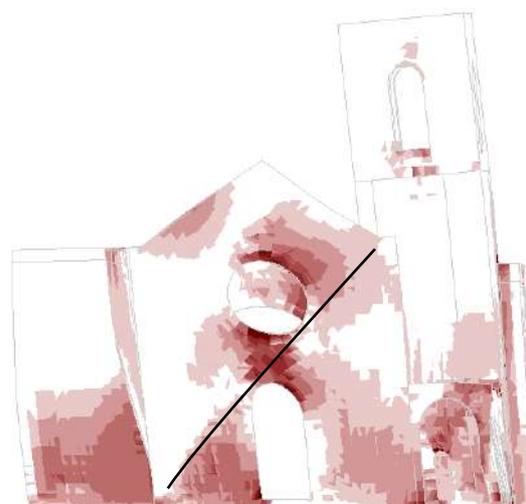


Figura 265 - Pushover dir. -X, Strains E1

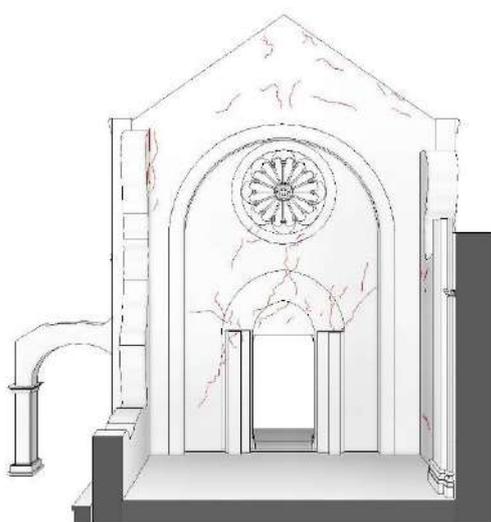


Figura 266 - Individuazione lesione a croce in controfacciata



Figura 267 - Controfacciata, rilievo fotografico

Anche le lesioni del campanile emerse a seguito dell'analisi sono compatibili con il quadro fessurativo individuato a seguito del sisma. Innanzitutto, è necessario individuare il fenomeno di distacco del campanile dal muro del transetto destro (Figura 268 e Figura 269). Questo meccanismo, ben visibile anche a seguito di indagine visiva in situ (Figura 270) emerge sia a seguito di analisi *pushover* in direzione +Y che in direzione -Y. La causa del fenomeno di rottura però appare diversa: per il caso di *pushover* in direzione +Y le deformazioni che appaiono maggiori in quel punto sembrano avvenire per schiacciamento del campanile sulla parete del transetto mentre, nel caso di *pushover* in direzione -Y, il danneggiamento avviene perché il campanile sembra "strapparsi" dalla muratura del transetto. È interessante, dunque, osservare come uno stesso fenomeno di rottura compare a seguito di due analisi diverse e di due meccanismi diversi.



Figura 268 – Pushover dir. +Y, Strains E1

Figura 269 - Pushover dir. -Y, Strains E1



Figura 270 – Distacco campanile, rilievo fotografico

Di rilevante importanza risulta anche il confronto con i risultati emersi dal modello e l'effettivo quadro fessurativo presente nel campanile. Emerge, infatti, anche dai risultati del modello per l'analisi *pushover* in direzione +Y nel modello senza coperture (Figura 271) la stessa lesione osservabile post sisma 2016 in situ nel campanile, che taglia in diagonale il campanile fino ad arrivare al basamento (Figura 272), presupponendo un fenomeno di ribaltamento dell'angolata, come descritto al Capitolo 7.3.



Figura 271 – Pushover dir +Y, Strains E1

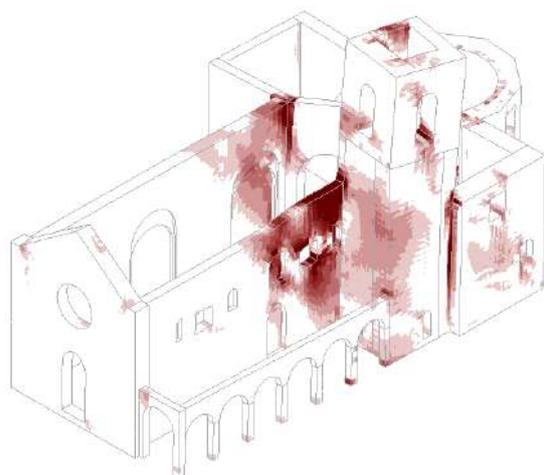


Figura 272 – Quadro fessurativo campanile, rilievo fotografico [Archivio SABAP]

Gli *strains E1* mostrano anche un fenomeno di rottura molto importante che si è verificato alla base della cella campanaria e si presume abbia portato, successivamente, al distacco della cella stessa e quindi al crollo del campanile verso l'interno della Basilica (Figura 273 e Figura 274).

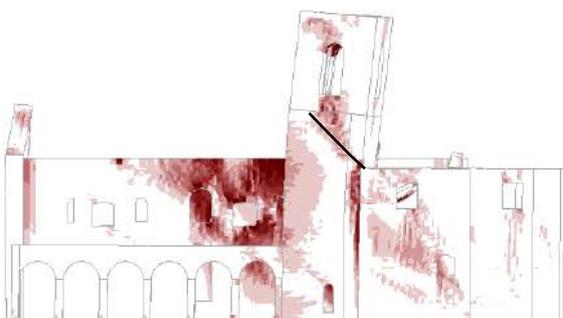


Figura 273 - Pushover dir +Y, Strains E1



Figura 274 - Quadro fessurativo del campanile
[Archivio SABAP]

Sempre per quanto concerne il campanile, appare di fondamentale rilevanza anche il fenomeno di rotazione della parte sommitale del campanile (Figura 275). Questo meccanismo è stato individuato a seguito di indagine visiva *in situ*. Come si può osservare dall'immagine in Figura 276 è evidente una rotazione centimetrica del campanile verso l'interno. Anche l'analisi *pushover* in direzione +Y ha portato a questo risultato. Il meccanismo di rotazione è probabilmente dovuto ad una differenza di rigidità tra la muratura esterna del transetto e l'arco che sostiene la volta a botte. Quest'ultimo ha una rigidità nettamente inferiore e ciò comporta la rotazione del campanile verso l'interno.

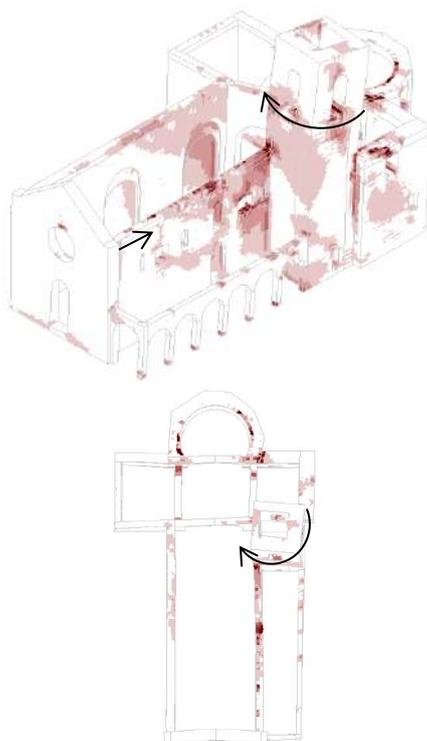


Figura 275 - Pushover dir. +Y, Strains E1



Figura 276 - Rotazione campanile, rilievo fotografico

In riferimento, invece, alla muratura del transetto che si trova dal lato del campanile è possibile, in questo caso, fare un confronto con il quadro fessurativo emerso. Si può notare una corrispondenza con la lesione individuata a seguito del sisma del 2016 e il danneggiamento che emerge dai risultati del modello (Figura 277).

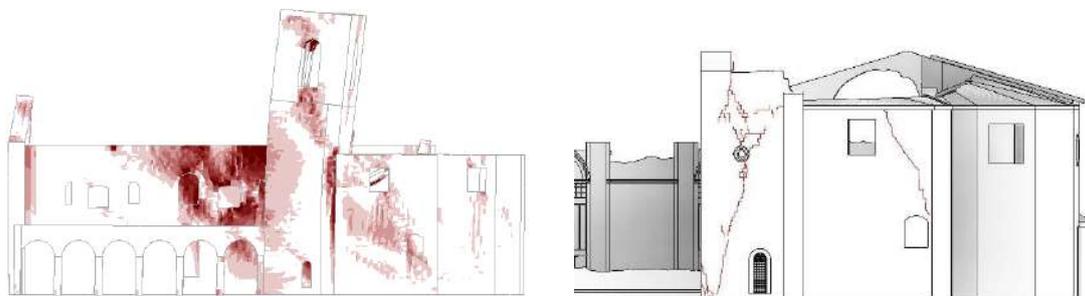


Figura 277 - Pushover dir. +Y, Strains E1 (sinistra) e quadro fessurativo transetto (destra)

Tra gli altri meccanismi individuati è importante citare il crollo della navata laterale sinistra. Questa, a seguito di analisi in direzione +X, appare come il secondo elemento più vulnerabile e soggetto quindi a rottura dopo il Portico delle Misure, anch'esso crollato anche nella realtà. Si possono confrontare i risultati dell'analisi con il crollo reale avvenuto nella Basilica. Nonostante l'adiacenza con il convento, la muratura è crollata verso l'interno, sintomo che le murature non erano ammassate l'una con l'altra. Il crollo avvenuto riguarda maggiormente la parte sommitale della parete della navata, come appare dai risultati della modellazione in DIANA FEA_{BV} (Figura 278 e Figura 279).

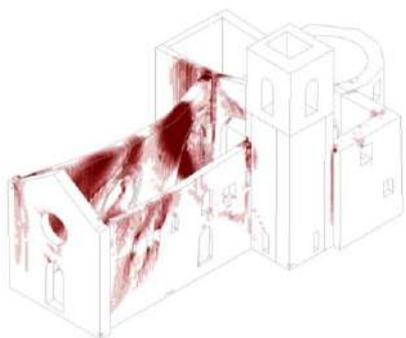


Figura 278 - Pushover dir. +X, Strains E1, modello senza coperture e senza portico



Figura 279 – Crollo parete navata sinistra, rilievo fotografico immediato post sisma [Archivio SABAP]

9. HERITAGE BUILDING INFORMATION MODELING (H-BIM)

Il concetto della conservazione del patrimonio culturale, così come è identificata la Basilica di San Benedetto a Norcia, si basa su degli aspetti fondamentali, individuabili nei valori storici e architettonici ma anche nell'importanza dei valori culturali da essi trasmessi [Simeone et al., 2019]. La pianificazione e la gestione dei progetti di conservazione, ma anche del recupero e del restauro, potrebbe essere migliorata avendo accesso al modello virtuale di un momento storico [López et al., 2018]. Per arrivare alla definizione di una metodologia che permetta di rappresentare un modello di un edificio esistente è necessario fare prima un breve accenno a quello che è il Building Information Modeling, spesso conosciuto semplicemente come BIM.

9.1 Dal concetto di BIM a H-BIM

Il BIM è una rappresentazione digitale del processo costruttivo che facilita lo scambio e l'interoperabilità delle informazioni. Un modello BIM contiene tutte le caratteristiche fisiche e funzionali di una costruzione (Figura 280). Il BIM, dunque, non è un software, ma rappresenta una metodologia che si pone in una posizione di distacco dal modo di progettare che si è delineato nel corso della storia fino ai giorni d'oggi, suscitando quello che è il maggiore dibattito nel settore dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni (*Architecture, Engineering and Construction, AEC*) [Eastman et al., 2011].



Figura 280 - Il BIM [<https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-rivoluzione-digitale-edilizia-building-information-modeling/>]

La modellazione BIM, sviluppata durante la fase di progettazione e implementata durante la fase di costruzione, mette a disposizione tutte le informazioni necessarie per gestire il ciclo di vita di un edificio. Per capire meglio i cambiamenti introdotti dal BIM è opportuno fare riferimento alla metodologia tradizionale, cioè all'utilizzo di un disegno CAD (*Computer-Aided Design*) 2D o 3D che è andato a sua volta a sostituire la redazione a mano di tutti gli elaborati grafici che compongono un disegno tecnico. Con questa sostituzione, per quanto si sia velocizzata la realizzazione dei disegni e lo scambio di informazioni, non si è arrivati ad un contributo decisivo per ridurre la frequenza delle incongruenze causate dall'elevato numero di documenti cartacei e dall'utilizzo di questi disegni da parte di diverse figure partecipanti al progetto.

Con una metodologia BIM, invece, si arriva ad uno sviluppo dell'automazione delle attività correlate ai progetti e ai processi basati su carta, creando un flusso di lavoro integrato e interoperabile in cui tutte le attività sono riunite in un modello coordinato e collaborativo tra le diverse figure professionali che partecipano al progetto (Figura 281). All'interno del modello è presente una perfetta condivisione dei dati e delle informazioni necessarie in cui ogni professionista, nell'ambito della propria area, può operare.

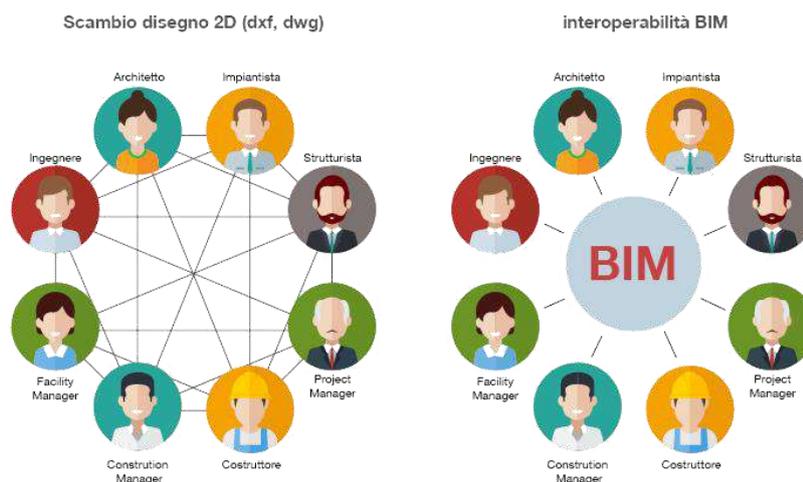


Figura 281 - L'interoperabilità della metodologia BIM [<https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/>]

Il BIM è un processo che si presta per le costruzioni ex-novo, per le quali la realizzazione di un progetto riveste un ruolo importante nell'integrazione informativa delle parti. Vista però l'importanza che al giorno d'oggi rivestono gli edifici esistenti, soprattutto quelli di rilevante carattere storico-artistico, il BIM si sta evolvendo in modo significativo anche nel campo della gestione e della documentazione del patrimonio culturale rappresentando, in un ambiente virtuale, l'effettivo stato di conservazione degli edifici analizzati.

Il termine Historical (o Heritage) Building Information Modeling (H-BIM), è stato utilizzato la prima volta nel 2009 in un articolo scientifico del professore Murphy del Dublin Institute of Technology [Murphy et al., 2009].

L'H-BIM è un processo applicato agli edifici esistenti, monumentali e non, che aumenta enormemente le potenzialità del metodo BIM, estendendo il suo utilizzo anche alla creazione di modelli del costruito esistente.

Le prime applicazioni del BIM agli edifici esistenti, e quindi dell'H-BIM, erano legate a edifici di interesse storico o monumentale, in quanto si puntava a dare vita ad un *database* nel quale si potessero raccogliere i modelli creati per l'inserimento, l'aggiunta e la divulgazione di informazioni relative agli edifici in oggetto con diversi scopi, dalla semplice restituzione geometrica all'utilizzo di diversi dati per le analisi.

Un modello H-BIM non è, dunque, inteso solo come restituzione digitale e geometrica in 3D, ma come un modello intelligente e ricco di informazioni, in cui tutte le parti che lo compongono sono anch'essi oggetti intelligenti, parametrici e con una semantica ben definita.

Tuttavia, la procedura di ricostruzione virtuale del patrimonio storico-culturale non è un compito facile perché gli oggetti da modellare sono costituiti da componenti complessi e irregolari che non sono rappresentati nelle librerie *software* BIM. Pertanto, è essenziale introdurre gli approcci storici e tecnici nell'ambiente BIM al fine di modellare le diverse componenti parametriche virtuali e realizzare un "*BIM as-is model*" del patrimonio architettonico analizzato [López et al., 2018].

Questi aspetti storici e tecnici possono essere, ad esempio, l'utilizzo di un rilievo laser-scanner, e dunque la creazione di una nuvola di punti. A parlare di questo concetto è stato lo stesso Murphy [Murphy et al., 2009], che definisce così l'Historic Building Information Modeling:

«Historic Building Information Modelling (HBIM) is a novel prototype library of parametric objects, based on historic architectural data, in addition to a mapping system for plotting the library objects onto laser scan survey data»⁴.

L'approccio H-BIM, dunque, parte dal rilievo delle strutture esistenti, in modo particolare mediante tecniche avanzate che permettono la restituzione di una nuvola di punti. Si prosegue con la modellazione, sia geometrica che informativa e infine si conclude con la gestione informativa della conoscenza acquisita per finalità diagnostiche e, se necessario, per la formulazione di ipotesi di intervento (Figura 282).

⁴ «Il Building Information Modeling Storico è una nuova libreria di oggetti parametrici basati su dati architettonici storici, in aggiunta ad un sistema di tracciamento destinato a posizionare le librerie al di sopra di rilievi ottenuti da scansione».

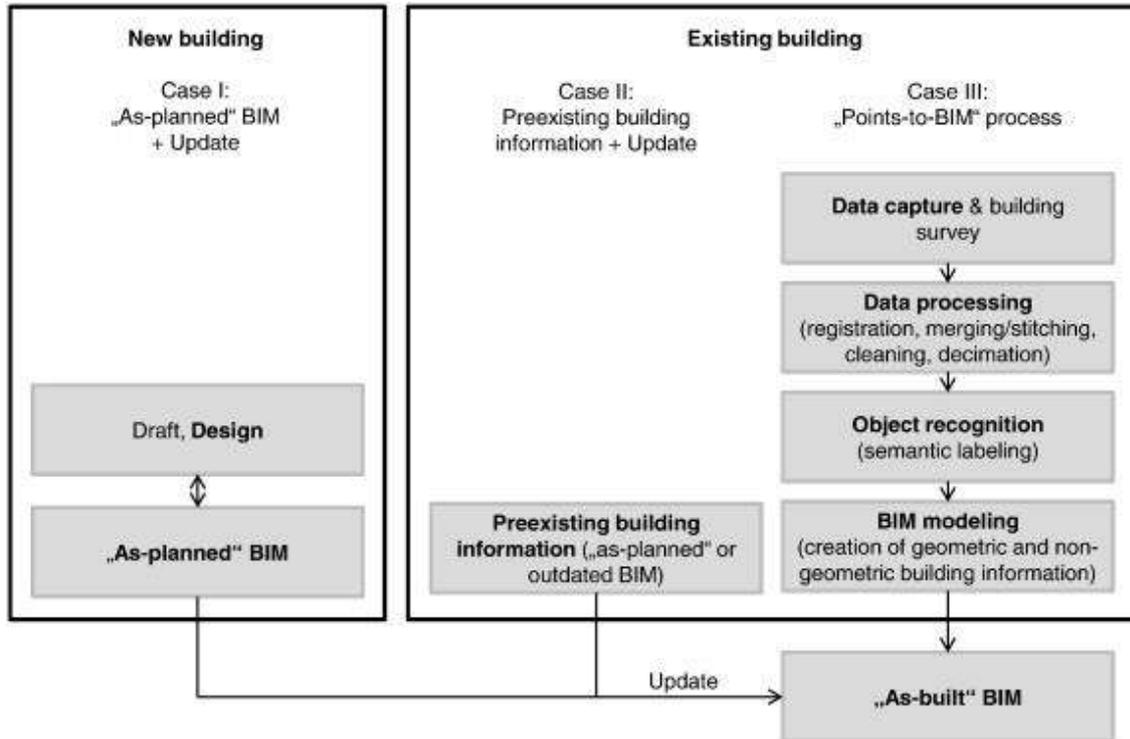


Figura 282 - Processo di creazione di un modello BIM di un edificio nuovo o esistente [Volk et al., 2014]

Nei capitoli a seguire si sviluppa nel dettaglio il percorso che è stato affrontato per quanto riguarda la Basilica di San Benedetto a Norcia, dalla realizzazione del modello 3D fino all’implementazione di informazioni specifiche all’interno di questo, al fine di renderlo un modello conoscitivo ed utilizzabile per diverse applicazioni e scopi.

Esistono diversi *software* per lo sviluppo di modelli BIM. Quello utilizzato per la modellazione del caso studio della Basilica è il *software Autodesk Revit 2020*.

9.2 “Reverse engineering”: dal rilievo geometrico alla realizzazione del modello informativo (H-BIM)

La modellazione BIM dell’edificio viene eseguita sulla base di diversi dati ed informazioni che si hanno a disposizione. Primo fra tutti la presenza di elaborati grafici esistenti, cartacei o CAD e, in secondo luogo, l’utilizzo di dati acquisiti via laser scanner.

Per la realizzazione del modello 3D della Basilica di San Benedetto a Norcia si disponeva di una nuvola di punti realizzata con l’ausilio di un drone (Figura 283) dal professore Achilli dell’Università degli studi di Padova, nell’ambito della Convenzione di Ricerca, in data settembre 2020 e quindi rappresentante lo stato dei luoghi.

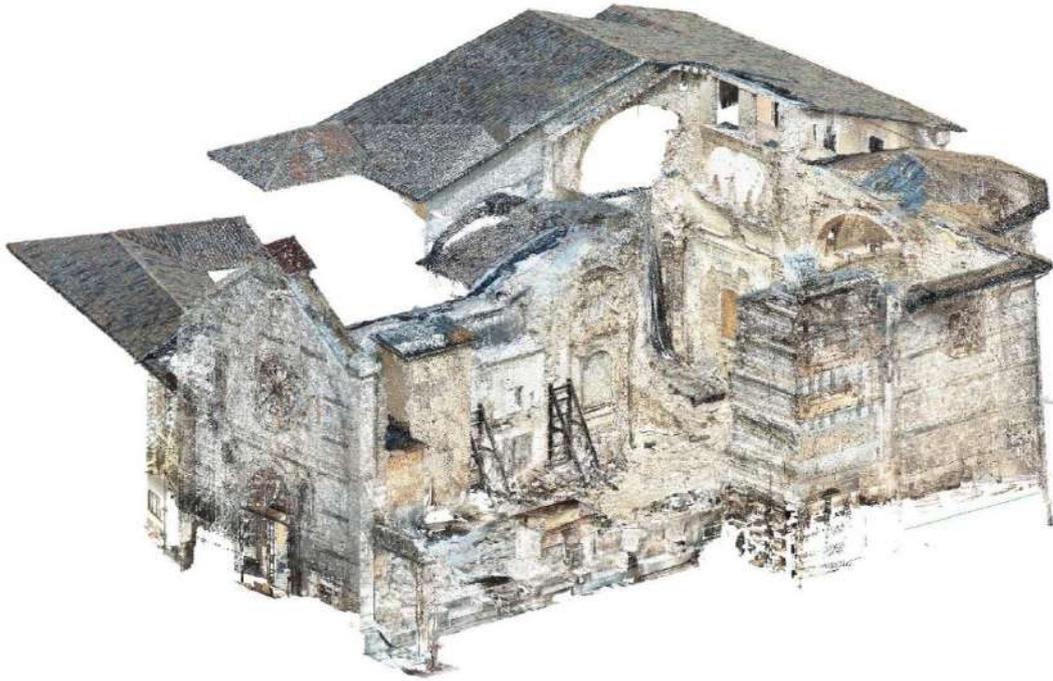


Figura 283 – Visualizzazione 3D della Nuvola di Punti della Basilica di San Benedetto a Norcia.

La nuvola di punti è stata importata in formato *.rcp all'interno del software BIM Autodesk Revit, ed è stata utilizzata per la realizzazione del modello "as-damaged" (Figura 284). La nuvola è servita, dunque, come riferimento metrico per la realizzazione del modello, così da avere una chiara traccia delle demolizioni e dei crolli avvenuti nella Basilica a seguito del sisma del 2016.

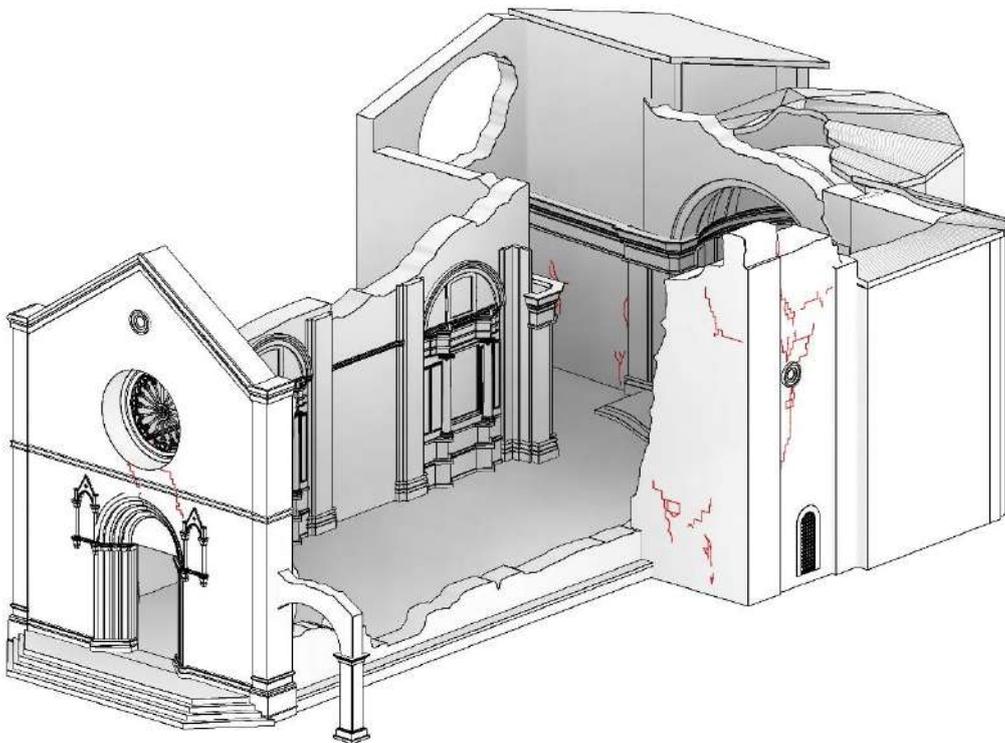


Figura 284 - Modello 3D dello stato di fatto in ambiente Revit

Come già osservato, la Basilica ha subito diverse trasformazioni e modifiche, più o meno consistenti nel corso dei secoli, causate essenzialmente da eventi sismici che hanno colpito quei luoghi. Per questo motivo il modello è stato dapprima rappresentato in una fase pre-sisma 2016 (Figura 285) utilizzando come riferimento i progetti del 1980 riportati in CAD che si avevano a disposizione.

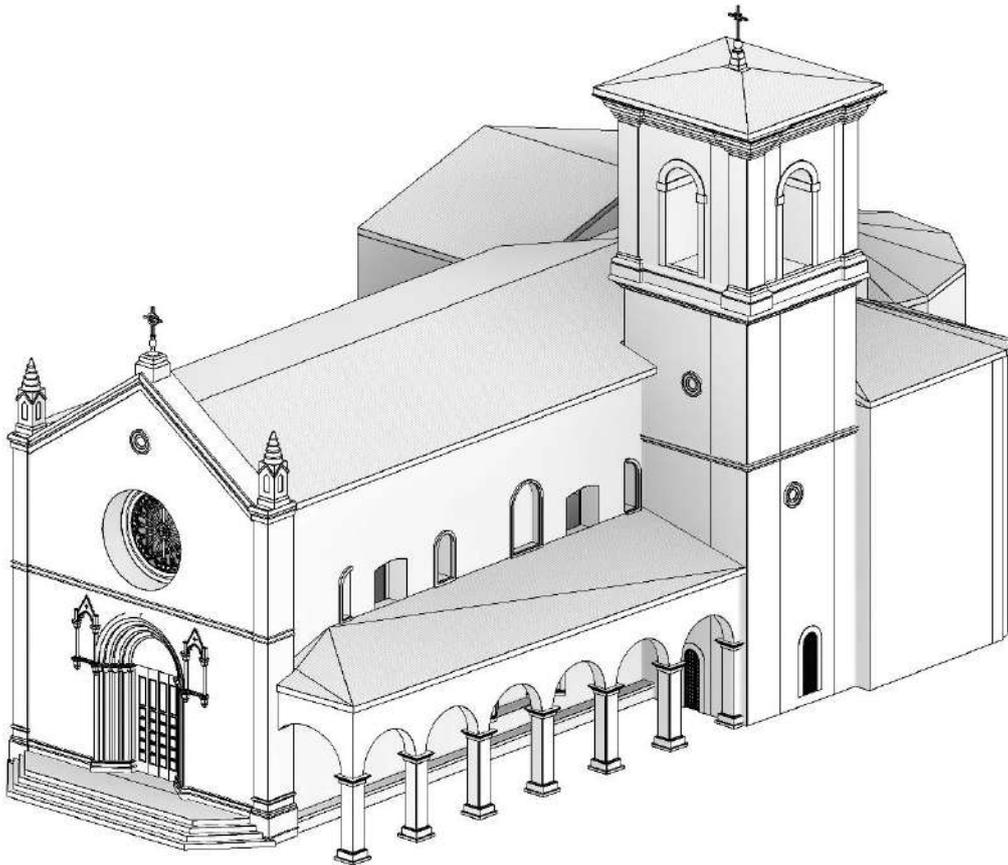


Figura 285 - Modello 3D della Basilica nella situazione pre-sisma 2016 in ambiente Revit

Attraverso la gestione dello strumento delle fasi è stato possibile, inoltre, rappresentare graficamente in termini volumetrici l'evoluzione storica della Basilica di San Benedetto, così come precedentemente illustrata al Capitolo 4.

La modellazione della Basilica, e più in generale di un edificio monumentale come quello del caso studio, non è un'operazione semplice in quanto gli edifici sono costituiti da elementi con geometrie complesse e irregolari, uniche nel loro genere, che non sono presenti all'interno delle librerie del software. Per questo motivo, dunque, si è costretti a ricorrere alla creazione di apposite famiglie parametriche da potere utilizzare poi all'interno del modello. Per geometrie più complesse e uniche all'interno dell'edificio si può scegliere di lavorare con modelli solidi *in-place*, cioè realizzati direttamente all'interno del modello qualora la difficoltà dell'elemento non renda possibile o renda sconveniente la sua realizzazione parametrica.

9.3 Livello di Dettaglio (LOD)

Se è vero che si può arrivare a descrivere geometricamente più o meno fedelmente un oggetto, è altrettanto vero che la standardizzazione e la veicolazione delle informazioni collegate a questo oggetto sono materia alquanto complessa.

Per definire con precisione il livello di approfondimento delle informazioni contenute all'interno del modello viene definito il "Level of Development" (LOD), in italiano "Livello di Sviluppo". I vari LOD hanno classificazioni diverse in ambito statunitense, britannico e italiano, poiché fanno riferimento non solo a diversi ambiti normativi, ma anche a contesti culturalmente differenti.

In ambito americano, il concetto di LOD viene proposto per la prima volta dall'American Institute of Architects (AIA) che ha pubblicato un quadro "Level Of Detail" per il Protocollo AIA G202-2013 Building Information Modeling. In questo contesto specifico il termine LOD si riferisce al "Livello di Sviluppo" necessario in relazione ai contenuti degli elementi del modello.

«Il "Livello di Sviluppo" (LOD) descrive i minimi dimensionali, spaziali, quantitativi, qualitativi, e altri dati inseriti in un Elemento del Modello per sostenere gli Usi Autorizzati associati a tale LOD» [AIA Document G202™, 2013].

Si attribuisce, quindi, un'accezione ampia al concetto di LOD, comprendendo sia gli aspetti grafici che quelli informativi. Il sistema statunitense definisce cinque stadi progressivamente dettagliati, definiti da una scala numerica in centinaia, da 100 a 500 (Figura 286).

LOD 100	LOD 200	LOD 300	LOD 400	LOD 500
				
Modello contenente i requisiti di prestazione e le specifiche del sito. Modello concettuale di massa utile allo studio di tutto l'edificio inclusi area di base e volume, orientamento, stima costi iniziale. Progetto preliminare.	Modello contenente i sistemi generalizzati con quantità, dimensioni, forme, posizione ed orientamento approssimati. Progetto definitivo.	Modello di produzione o pre-costruzione, e per gli "intenti progettuali". Modello accurato e coordinato, utile per una stima più accurata dei costi. Progetto Esecutivo.	Modello accurato con i requisiti di costruzione e gli elementi costruttivi specifici.	Modello "as built" dell'edificio che mostra il progetto così come è stato realizzato.

Figura 286 - Quadro riassuntivo dei livelli LOD statunitensi
[<https://www.01building.it/bim/lod-progettazione-bim/>]

Il LOD 500 è inteso come il livello di dettaglio *“as-built”*. Esso può rappresentare anche l’*“as-damaged”* nel caso in cui l’edificio sia interessato da fenomeni di degrado e dissesti, come appare per il caso studio in questione.

In Italia, invece, la definizione dei LOD, intesi come *Level of Detail*, è normato dalla UNI 11337-4:201. La norma, in particolare, fa propria la distinzione terminologica fondamentale tra LOD, LOG e LOI (Figura 287). Per ogni LOD le informazioni necessarie per la descrizione dell’oggetto sono di due tipi e comprendono al loro interno i LOG - *Livello di Dettaglio degli Oggetti, attributi Geometrici* - e i LOI - *Livello di Dettaglio degli Oggetti, attributi Informativi* -. I LOG, dunque, si riferiscono agli elementi grafici i LOI si riferiscono alla descrizione di informazioni non grafiche.

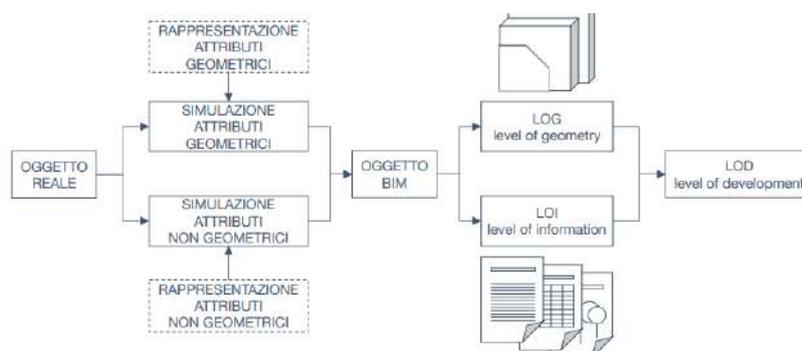


Figura 287 – Entità oggetti, LOD [<https://assoacmi.it/wp-content/uploads/2017/07/UNI11337-Pavan.pdf>]

Nella norma italiana [UNI 11337-4:201] vengono utilizzate le lettere dell’alfabeto per categorizzare i Livelli di Dettaglio. Essi vanno dal LOD A al LOD G (Figura 288). Il LOD A corrisponde all’oggetto simbolico con caratteristiche qualitative e quantitative puramente indicative. I LOD da A ad E sono poco significativi se non per la creazione di modelli di natura specialistica. La rappresentazione e l’insieme delle informazioni si fa poi sempre più dettagliato fino ad arrivare al LOD F.

Nel LOD F gli oggetti rappresentano l’*as-built*, o come definito prima *as-damaged*, corrispondenti quindi ad una fedele rappresentazione geometrica dell’edificio. Sono possibili astrazioni che consentono di raggruppare famiglie di oggetti simili o aggregazioni di oggetti coerenti. Sono definiti, per ogni singolo oggetto, gli interventi di gestione, manutenzione e/o riparazione da eseguirsi lungo un arco temporale di programmazione. Il LOD F corrisponde al LOD 500 della scala LOD statunitense.

Per ultimo si ha il LOD G, che è una prerogativa della norma italiana e corrisponde ad una rappresentazione storicizzata specifica dell’oggetto. Si rappresenta perciò l’*as-is*. Gli oggetti, dunque, rappresentano in modo virtuale lo stato di fatto aggiornato ad un tempo ben definito e contengono la rappresentazione storicizzata dei cambiamenti che l’hanno interessato. Nel modello, dunque, è annotato ogni intervento di gestione, manutenzione e/o riparazione e sostituzione eseguito nel tempo, così come sono registrate tutte le forme di degrado eventualmente presenti.

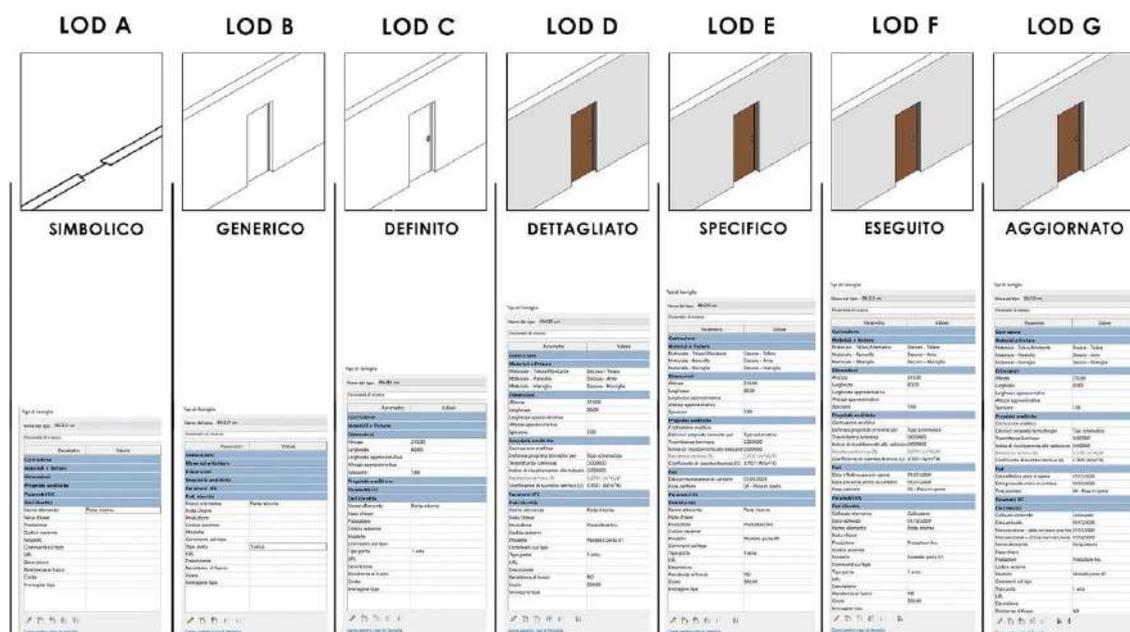


Figura 288 – LOD [https://it.linkedin.com/pulse/i-lod-livelli-di-dettaglio-nel-bim-spiegati-bene-edoardo-pruneri]

Facendo riferimento alle scale LOD definite finora gli ultimi due livelli, il LOD F e il LOD G, sono dunque i LOD specifici per il recupero e il restauro, e quindi per la realizzazione di un modello “*BIM as-is model*” del patrimonio architettonico, così come è stato definito precedentemente.

9.4 Digitalizzazione del danno

Con il modello della Basilica, così come descritto al paragrafo 9.2, si raggiunge un LOD F italiano, corrispondente al LOD 500 americano. Si ha, ovvero, l’*as-damaged* della Basilica di San Benedetto a seguito del sisma del 2016. Nel modello, infatti, viene riportata anche una rappresentazione dettagliata dei danni che si sono verificati nella Basilica a causa della sequenza sismica avvenuta da agosto a ottobre del 2016 (Figura 289 e Figura 290), così come è stato ampiamente trattato al Capitolo 7. A questi elementi che descrivono il danno sono stati successivamente attribuiti dei parametri, in modo da passare quindi da un LOD F ad un LOD G.

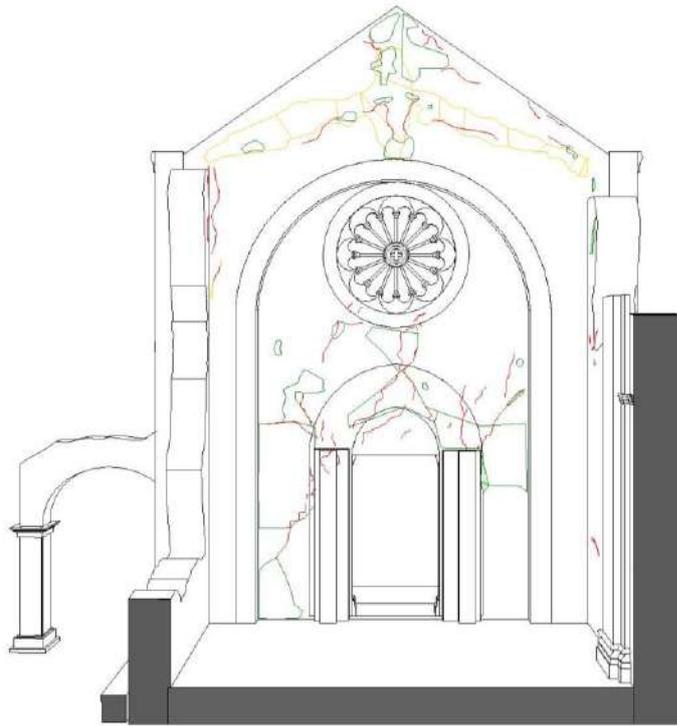


Figura 289 - Sezione assometrica dello stato di fatto della parete in controfacciata

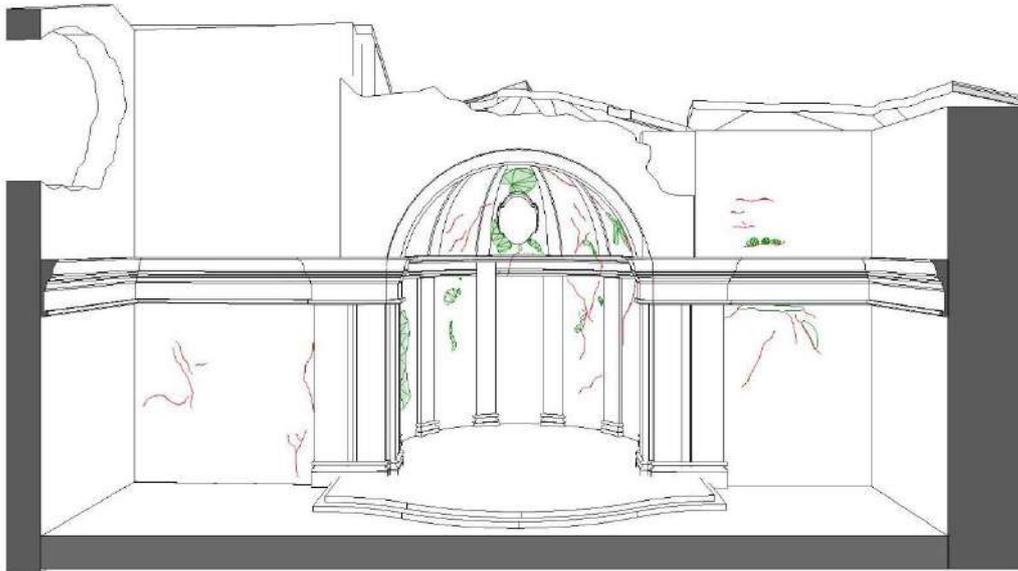


Figura 290 - Sezione assometrica dello stato di fatto della parte absidale

Per quanto concerne la mappatura del degrado, si è ricorso alla creazione di una Famiglia di “Modello Generico Metrico Adattivo”, di spessore 1 mm che viene sovrapposta al muro per segnalare la presenza del degrado. La Famiglia appositamente creata è in grado di assumere diverse conformazioni in base alle superfici sulle quali viene applicata.

Nella nuova Famiglia di *Modello Generico Metrico Adattivo* viene posizionato un numero di punti adattivi sul piano di riferimento verticale. I punti vengono posizionati in senso orario o antiorario,

che dovrà essere rispettato nel momento in cui si inseriscono i punti della famiglia nel progetto. I punti adattivi sono collegati da una *spiline* di riferimento: in questo modo, selezionando il perimetro è possibile creare un solido attraverso il comando *Genera Forma* al quale viene attribuito lo spessore di 1 mm, in modo tale da ottenere un elemento dotato di larghezza minima da potere posizionare sulla superficie muraria (Figura 291).

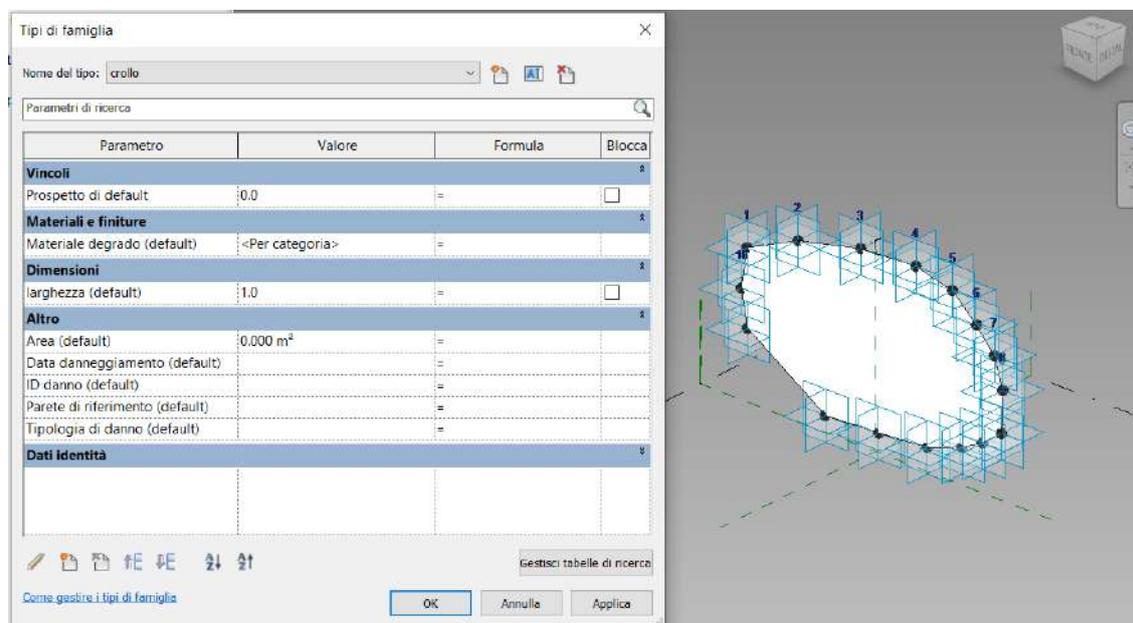


Figura 291 - Famiglia Revit di Modello Generico Metrico Adattivo, degrado e relativi parametri

All'elemento sono poi stati assegnati diversi parametri informativi, incrementando quindi il livello di informazione LOI degli elementi e passando quindi da un LOD F, rappresentante l'*as-built* ad un LOD G, contenente quindi un livello di informazioni elevato.

I parametri che sono stati inseriti in riferimento al danno sono i seguenti:

- *Tipologia di degrado*: per indicare il tipo di degrado indicato secondo le raccomandazioni contenute nella NorMaL 1/88, oggi UNI 11182/2006;
- *Data danneggiamento*: per indicare quando si è verificato il danno in questione, se con l'evento sismico di agosto, del 26 ottobre o con il crollo della Basilica;
- *ID danno*: è un conteggio numerico fatto automaticamente mediante uno *Script Dynamo* che identifica quel particolare oggetto;
- *Parete di riferimento*: per indicare il contrassegno che è stato attribuito alla parete in modo da avere un riferimento numerico della parete a cui è associato l'oggetto;
- *Area*: per calcolare l'estensione di ogni degrado.

Importata la famiglia all'interno del progetto, è possibile rappresentare le parti interessate dal degrado, inserendo i punti nella superficie di un elemento o in un piano di riferimento e seguendo il senso precedentemente scelto durante la creazione della famiglia.

La famiglia "*Degrado*" è stata duplicata tante volte quanti sono i tipi di degrado individuati. Nel caso specifico della Basilica di San Benedetto si fa riferimento al *crollo* o al *distacco*.

Per il parametro *Area* è stato utilizzato il plug-in di *Revit Dynamo*, in quanto il software non calcola in modo automatico l'area nella Famiglia di Modello Generico Metrico Adattivo.

All'interno dell'interfaccia di *Dynamo*, per prima cosa, si è creato il nodo "Family Type", grazie al quale è possibile selezionare le Famiglie di degrado utilizzate nel modello. Al fine di ottenerne l'area, essendo una Famiglia formata da punti, si sono individuati i punti adattivi e si è calcolata la superficie formata da essi. Infine, mediante l'utilizzo del nodo "Element.SetParameterByName", aggiungendo il parametro chiamato "Area" tramite il nodo "string", si ottiene il relativo valore di superficie, visibile nelle proprietà della Famiglia in *Revit*. Lo script completo è visibile in Figura 292.

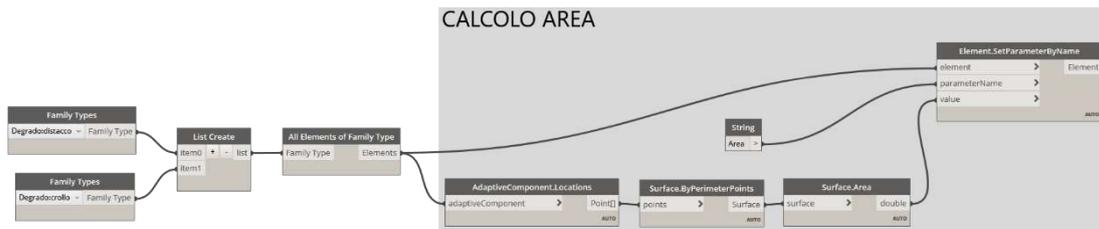


Figura 292 - Script Dynamo per la creazione del parametro Area

Anche per quanto riguarda il parametro *ID danno* è stato necessario l'utilizzo del plug-in di *Revit Dynamo*, in modo da potere ottenere una attribuzione rapida e non manuale di una numerazione del danno all'interno del modello, così da avere una identificazione univoca all'interno del progetto. All'interno dell'interfaccia di *Dynamo*, come avvenuto per il parametro *Area*, con l'utilizzo del nodo "Family Type" è stato possibile selezionare tutte le Famiglie di *Degrado* utilizzate nel modello. Tramite il nodo "List.Count" è stato possibile creare una lista di tutti gli elementi presenti e quindi numerarli in ordine partendo da 1. Questo valore è stato attribuito al parametro *ID danno* della Famiglia in *Revit* mediante il nodo "Parameter.SetValue". Lo script è visibile in Figura 293.

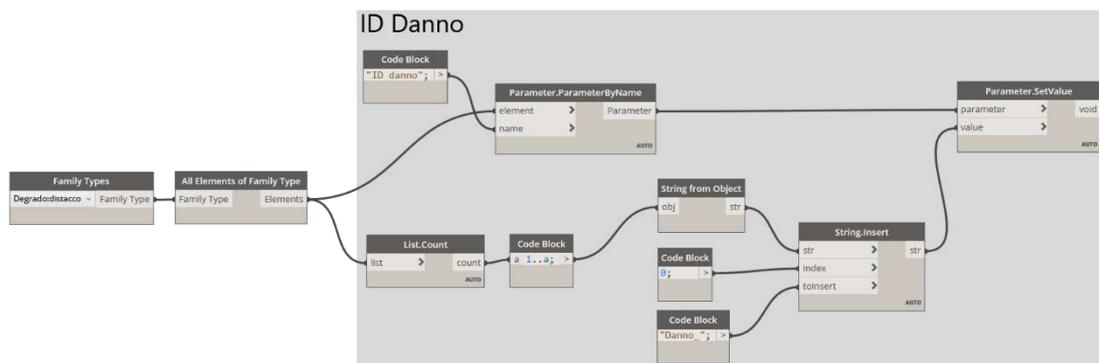


Figura 293 - Script Dynamo per la creazione del parametro ID danno

Per la mappatura del quadro fessurativo, come nel caso precedente, è stata creata una Famiglia di *Modello Generico Metrico Adattivo*. Anche in questo caso nella famiglia vengono posizionati un numero di punti adattivi l'uno sopra l'altro, andando a formare una linea. I punti, resi adattivi mediante l'apposito comando, vengono collegati da una *spiline* di riferimento (Figura 294). Come

nel caso precedente, viene quindi generata una forma e viene attribuito uno spessore significativo al fine di rendere visibile la fessura nel modello.

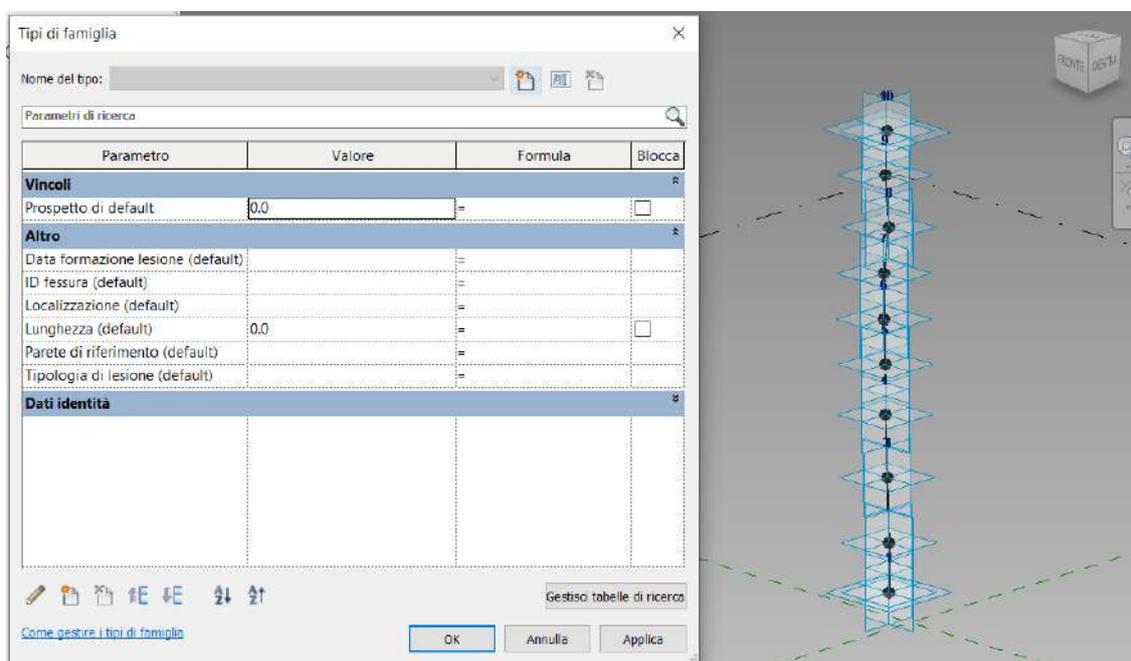


Figura 294 - Famiglia Revit di Modello Generico Metrico Adattivo, fessura lineare e relativi parametri

I parametri che sono stati inseriti in riferimento al danno sono i seguenti:

- *Tipologia di lesione*: per distinguere le lesioni tra passanti e non passanti o appartenenti ad un complesso di fessurazioni diffuse o a taglio;
- *Data di formazione della lesione*: per indicare quando si è verificato il danno in questione, se con l'evento sismico di agosto, del 26 ottobre o con il crollo della Basilica;
- *ID Fessura*: è un conteggio numerico fatto automaticamente mediante uno Script Dynamo che identifica quel particolare oggetto;
- *Parete di riferimento*: per indicare il contrassegno che è stato attribuito alla parete in modo da avere un riferimento numerico della parete a cui è associato l'oggetto;
- *Localizzazione*: per individuare all'interno della parete di riferimento la posizione in cui si trova la fessura (parte alta, centro, parte inferiore);
- *Lunghezza*: per calcolare l'estensione di ogni fessura.

Come illustrato per la Famiglia di Modello Generico *Degrado*, anche per le fessure, per l'assegnazione del parametro *Lunghezza* e *ID Fessura*, è stato necessario ricorrere all'utilizzo del plug-in Dynamo. Le procedure di realizzazione dello *script* che hanno portato al calcolo della lunghezza delle fessure e all'identificazione di esse mediante una numerazione progressiva sono analoghe a quelle spiegate in precedenza. In Figura 295 è visibile lo *script* per la creazione del parametro *lunghezza*, mentre in Figura 296 è visibile lo *script* realizzato per la definizione del parametro *ID Fessura*.

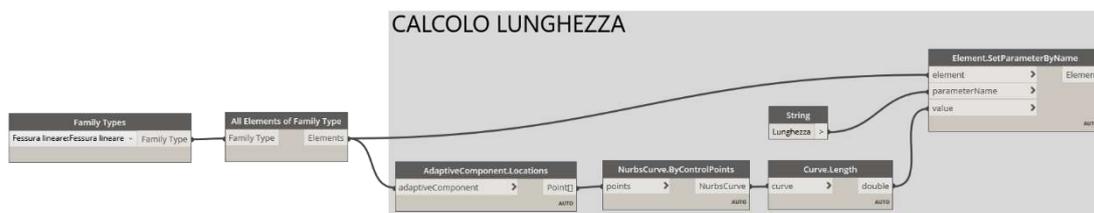


Figura 295 - Script Dynamo per la creazione del parametro Lunghezza

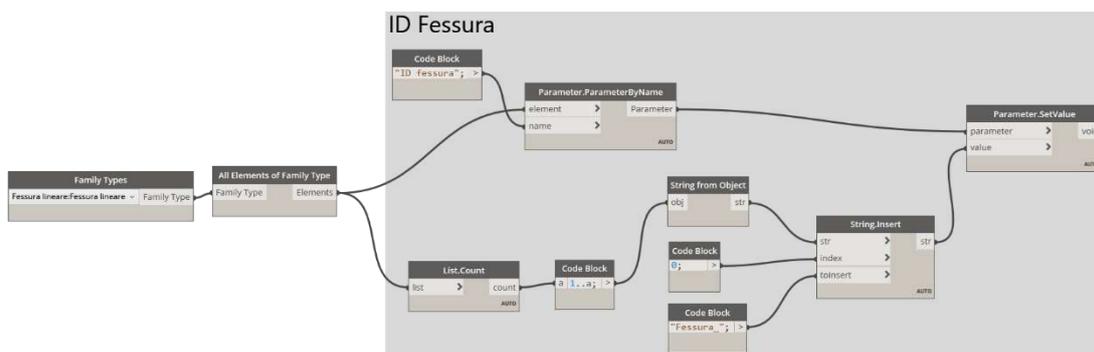


Figura 296 - Script Dynamo per la creazione del parametro ID Fessura

9.5 Digitalizzazione

Al fine di rendere informativo il modello e raggiungere un LOI adeguato si è deciso di introdurre dei parametri anche all'interno degli oggetti *muro* in ambiente *Revit*. Questi parametri rappresentano un livello di descrizione che non fa riferimento al danneggiamento ma alle proprietà meccaniche dell'elemento.

Si è perciò ritenuto opportuno inserire all'interno dell'elemento *muro* una serie di parametri che possano individuarne le proprietà meccaniche (Figura 297), quali:

- *Tipologia Muraria*;
- *Riferimento normativo*: si fa riferimento alle tipologie murarie presenti in Circolare 2019, al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti.

Congiunti a tutti quei parametri che emergono dall'analisi di qualità muraria della muratura in questione:

- IQM_V : indice di qualità muraria per azioni verticali;
- *Classe IQM_V* : classe di appartenenza;
- IQM_{NP} : indice di qualità muraria per azioni che agiscono nel piano della muratura;
- *Classe IQM_{NP}* : classe di appartenenza;
- IQM_{FP} : indice di qualità muraria per azioni che agiscono perpendicolarmente alla muratura;
- *Classe: IQM_{FP}* : classe di appartenenza.

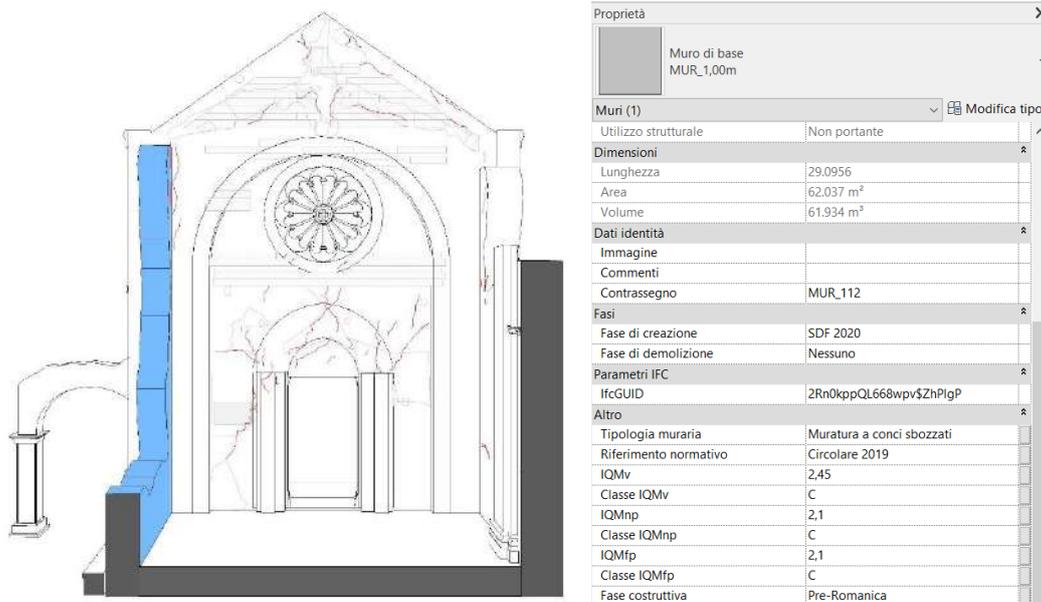


Figura 297 - Parametri proprietà meccaniche muro

Sono inoltre stati creati degli elementi *ad hoc* al fine di rappresentare graficamente, e dunque localizzare, le prove che sono state eseguite durante la campagna di indagini in situ.

Sempre in riferimento alla facciata si può notare l'inserimento, in facciata e controfacciata, di una Famiglia di *Modello Generico Metrico* rappresentante le due prove soniche che sono state eseguite (cfr. Capitolo 5.2) mediante una superficie pari all'area di indagine sonica e con un'estrusione di pochi millimetri.

Alla Famiglia di *Modello Generico Metrico*, denominata *Prova Sonica*, sono stati assegnati i seguenti parametri, visibili in Figura 298:

- Immagine velocità soniche;
- Tavola di riferimento;
- Velocità sonica massima;
- Velocità sonica media;
- Velocità sonica minima.

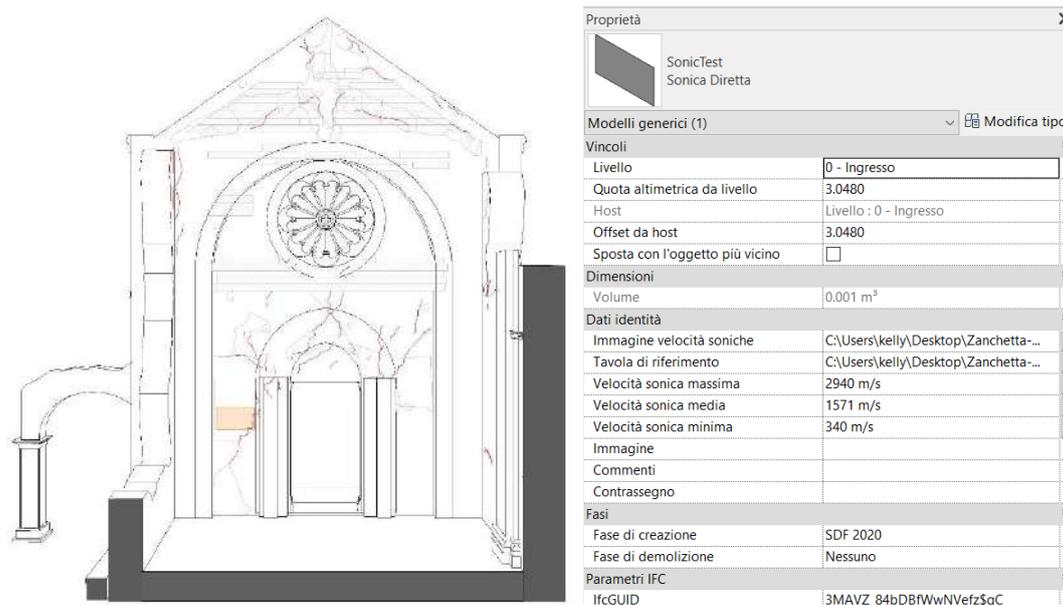


Figura 298 - Test sonici

In facciata sono state eseguite, inoltre, prove georadar. Anch'esse sono state localizzate in facciata con l'inserimento di una Famiglia di *Modello Generico Metrico* realizzata *ad hoc* e rappresentante il percorso del georadar sulla muratura (Figura 299). I parametri inseriti per questa tipologia di prova sono:

- Lunghezza di indagine;
- Velocità attraversamento onda;
- Radargramma.

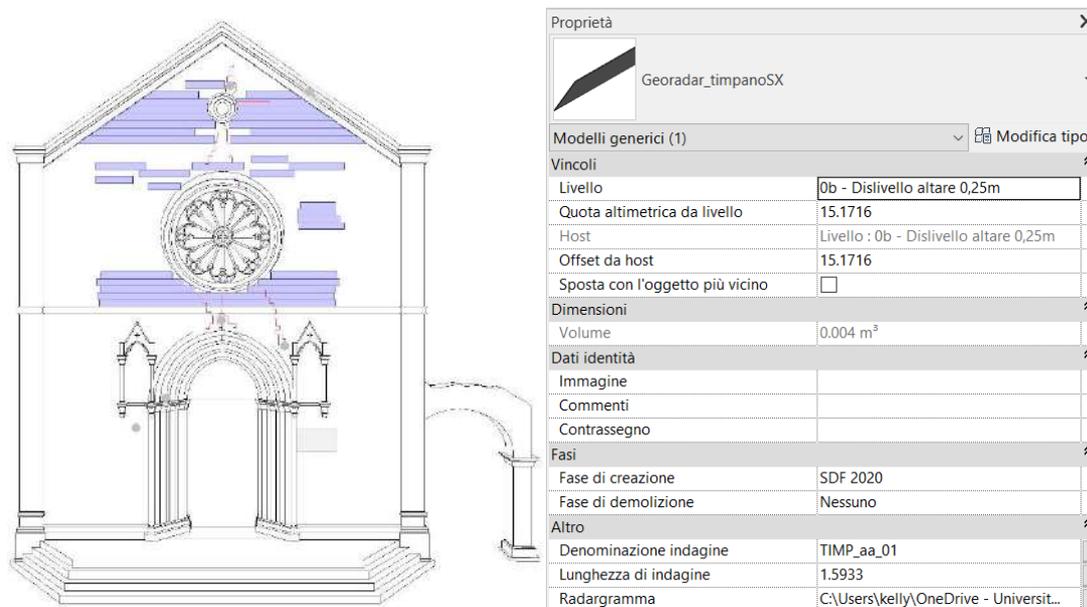


Figura 299 - Indagini Georadar

Infine, come ultimo elemento introdotto in facciata, si è inserita un'altra Famiglia di *Modello Generico Metrico* che definisce in modo puntuale i prelievi di materiale legante effettuati in facciata e in controfacciata nelle due diverse campagne di indagine (Figura 300).

I parametri ad essi associati sono:

- *Denominazione;*
- *Gruppo appartenenza risultati;*
- *Fase storica.*

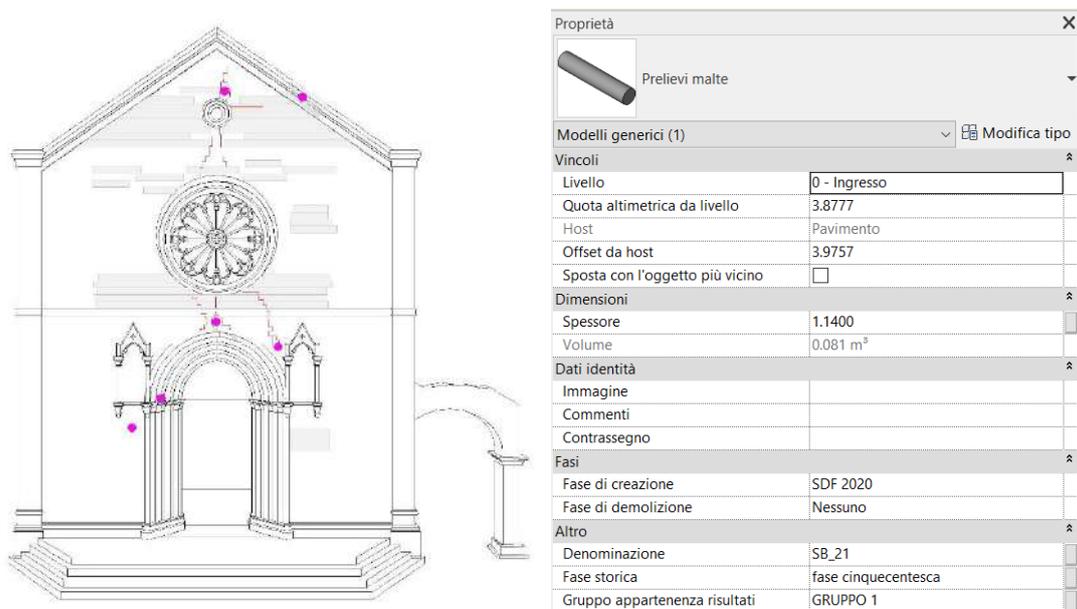


Figura 300 - Prelievi di materiale legante

9.6 Industry Foundation Classes (IFC)

L'*Industry Foundation Classes* (IFC) [ISO 16739:2013] è un formato dati aperto, nato per facilitare l'interoperabilità tra i vari operatori. Ha lo scopo di consentire l'interscambio di un modello informativo senza perdita o distorsione di dati o informazioni. Essendo il modello BIM (o H-BIM) un modello informativo, il formato IFC è necessario al fine di garantire l'interoperabilità tra diversi *software BIM* e l'interscambio dei dati in modo sicuro, senza errori e/o perdita di informazioni.

Essendo il formato IFC uno standard aperto, le specifiche tecniche di IFC sono liberamente accessibili dal sito di *buildingSMART*. In generale, IFC è una descrizione digitale standardizzata dell'ambiente costruito.

«La specifica dello schema IFC è il principale prodotto tecnico di *buildingSMART International* per raggiungere il suo obiettivo di promuovere l'*openBIM*»
[<https://www.buildingsmartitalia.org/standard/standard-bs/industry-foundation-classes-ifc/>].

IFC è infatti pensato per elaborare tutte le informazioni degli oggetti che fanno parte di un progetto edile, relativo però non solo alle componenti fisiche del manufatto, quali porte finestre muri, ma anche a concetti astratti quali tempistiche di lavorazione, costi, etc.

IFC si propone come metodologia per descrivere l'oggetto edilizio, scomponendolo in varie parti, che andranno poi incasellate sotto una precisa classe informatica, definita *IfcClass*. In questo modo l'oggetto possiede determinate proprietà ed è caratterizzato da una serie di informazioni [Paparella et al., 2020].

Una volta esportato un modello IFC, questo può essere utilizzato per passare le informazioni ad altri *software BIM*.

La versione ad oggi più aggiornata è IFC4. Il formato di un file IFC è il file STEP, compilato con il linguaggio EXPRESS. La logica dell'IFC si fonda su tre concetti fondamentali, che rappresentano la struttura stessa e definiscono *IfcObjectDefinition*, *IfcRelationship*, *IfcPropertyDefinition* (Figura 301).

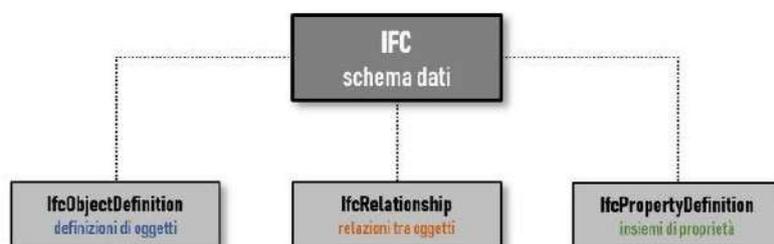


Figura 301 - Diagramma composizione schema dati IFC
[<https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcobjectdefinition/>]

La classe *IfcObjectDefinition* racchiude tutti gli *oggetti* utili a descrivere compiutamente un manufatto del costruito. La parola *oggetto* è da intendersi come un'entità astratta o tangibile che rappresenta la descrizione di una parte della costruzione che stiamo digitalizzando. In Figura 302 si può osservare cosa viene compreso all'interno della classe *IfcObject*.

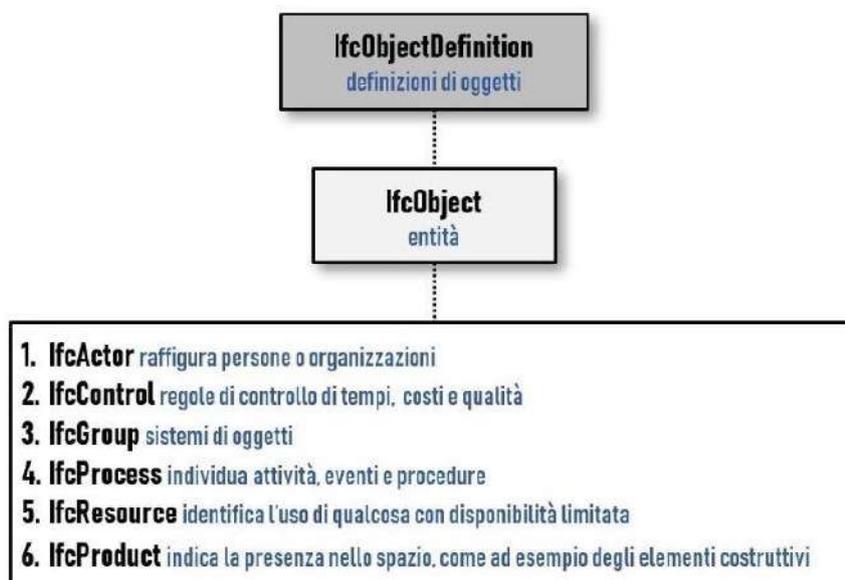


Figura 302 - Architettura file IFC | Diagramma suddivisione *IfcObjectDefinition*
[\[https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcobjectdefinition/\]](https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcobjectdefinition/)

In modo particolare, *IfcProduct* può essere considerata come la classe base per tutte le entità di un progetto ed è costituita, quindi, da elementi spaziali, elementi fisici, elementi di analisi strutturale ed altri concetti. I prodotti possono avere materiali associati, rappresentazioni di forma ed il loro posizionamento nello spazio. Si vedono alcuni esempi in Figura 303. A questa *classe* appartengono anche gli elementi quali muri (*IfcWall*), porte (*IfcDoor*), finestre (*IfcWindows*) etc.

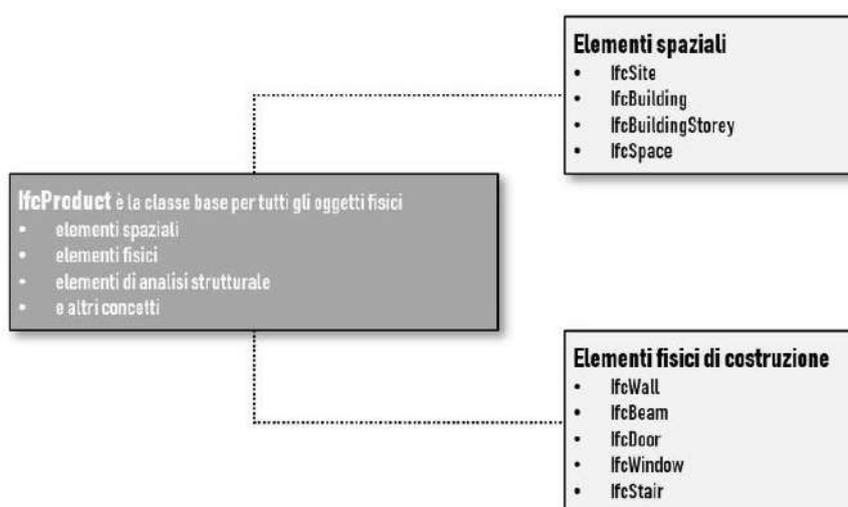


Figura 303 - Architettura file IFC | Diagramma ripartizione classe *IfcProduct*
[\[https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcobjectdefinition/\]](https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcobjectdefinition/)

IfcRelationship descrive invece quelle che sono le relazioni tra le entità. Ciascuno di questi cinque tipi, si specializza in ulteriori relazioni tra oggetti, tipi, proprietà, etc. così come illustrato in Figura 304.

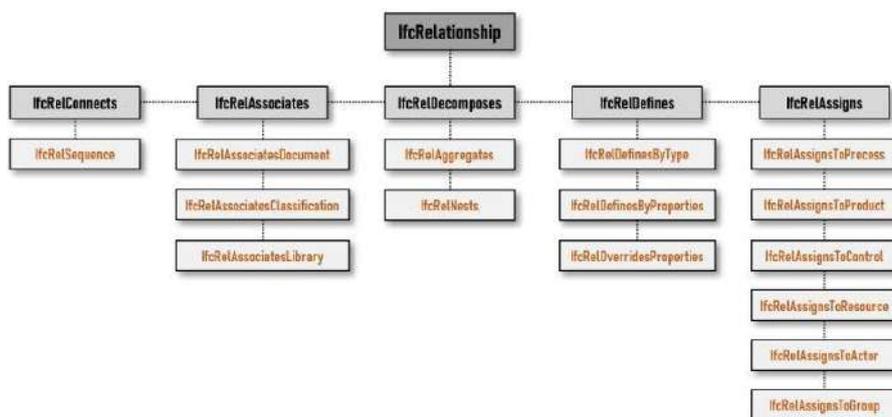


Figura 304 - Architettura file IFC | Diagramma ripartizione classe *IfcRelationship*
[<https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcrelationship/>]

IfcPropertyDefinition consente la generalizzazione di tutte le proprietà che possono essere assegnate agli oggetti (Figura 305). Questa generalizzazione permette la definizione di set di proprietà o di tipologie di oggetti (*type object*). Queste proprietà definiscono le informazioni condivise tra più istanze di oggetti.

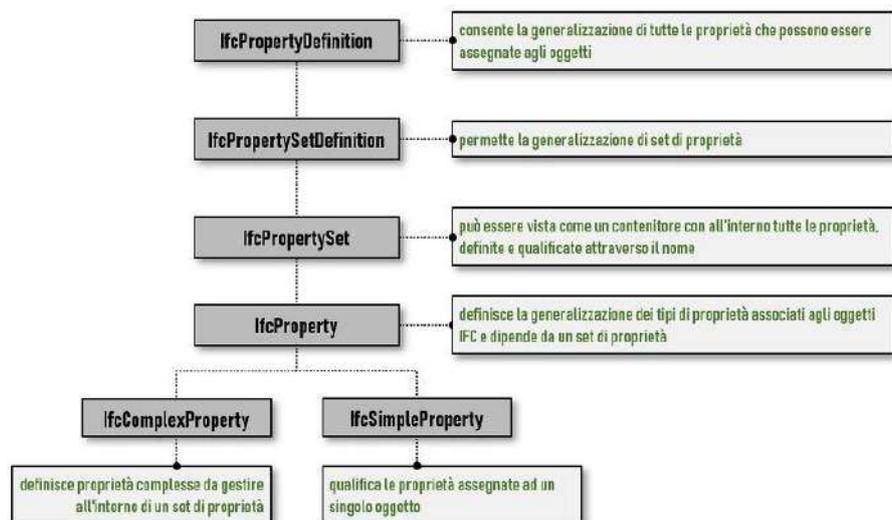


Figura 305 - Architettura file IFC | Diagramma ad albero *IfcPropertyDefinition*
[<https://bim.acca.it/ifc-property-definition/>]

Tra queste, *IfcPropertySet* rappresenta il contenitore al cui interno si possono trovare tutte le proprietà in una struttura ad albero. Ogni insieme di proprietà è definito attraverso un nome appropriato individuato attraverso il prefisso "Pset_Xxx".

In IFC, ad ogni classe di elementi sono associati dei valori tipici. Per ogni elemento, ad esempio un muro (*IfcWall*), abbiamo delle proprietà generali proprie del muro che prendono il nome di *Pset_WallCommon*, così come per le finestre avremo le classi di proprietà *Pset_WindowCommon*, e così via per ognuno degli elementi IFC. A questi si aggiungono altre categorie che variano di volta

in volta in base alle caratteristiche dei materiali utilizzati. In conclusione, quindi, è all'interno dei *PSet* che troviamo tutte le proprietà di un elemento in una esportazione IFC.

Fin dall'introduzione del BIM e dell'IFC nel campo AEC, il tema dell'arricchimento semantico è stato studiato al fine di migliorare la qualità e il livello delle informazioni non geometriche associate a rappresentazioni tridimensionali, spesso attraverso l'implementazione e l'evoluzione di schemi IFC [Simeone et al., 2019].

In riferimento, però, ad un edificio esistente si può osservare come uno schema standard IFC non sia pienamente adatto alla specificità, all'unicità e all'importanza di un edificio categorizzato come un bene culturale. Si può osservare, infatti, come alcune informazioni necessarie per la descrizione del patrimonio esistente, quali ad esempio la presenza di danneggiamento o fessurazioni, non possono essere esportate con lo schema classico di IFC. Così come, a ritroso, nella modellazione H-BIM i due elementi sopra citati sono stati creati su una classe di elemento che viene esportata come *IfcBuildingElementPart*, quindi non con una classe a loro dedicata.

Per questi elementi, inoltre, manca un'adeguata e necessaria standardizzazione. Si possono creare dei *PropertySet* e dei *PSet* che però sono a discrezione dell'utente, non trovando una corrispondenza all'interno di nessuna classe IFC. Questo va a complicare la procedura di esportazione e l'interoperabilità standardizzata che si vuole ottenere con IFC. Ogni esportazione, infatti, potrebbe classificare i degradi attraverso una propria codifica interna, creando attributi IFC sempre diversi da studio a studio.

Nel caso della Basilica di San Benedetto si è, quindi, proceduto scegliendo questa strada, ovvero con una esportazione in IFC mediante la creazione di *PSet* proprietari laddove questi non fossero già definiti all'interno della classe dell'elemento.

Al fine di ottenere un'esportazione IFC completa della Basilica, sono stati creati dei *PSet* proprietari per le famiglie di *Modello Generico Metrico Adattivo* create al fine di rappresentare nel modello il degrado e le lesioni, con l'inserimento al loro interno dei relativi parametri (Capitolo 9.4). Una famiglia di *Modello Generico Metrico Adattivo* viene esportata in IFC come *IfcBuildingElementPart*. L'esportazione predefinita di IFC in *Revit* esporta solo gli *IFC Common Property Sets*, quindi quelli standardizzati appartenenti alla classe *IfcBuildingElementPart*.

Al fine di esportare in IFC le proprietà definite dall'utente è necessario procedere con l'esportazione mediante l'utilizzo di *User Defined Property Set*, quindi delle proprietà definite dall'utente.

Si procede, quindi, nell'implementazione di un file di testo, che si trova all'interno del percorso file di *Revit* e denominato "*DefaultUserDefinedParameterSets*". Al suo interno si aggiunge pertanto il nome del *PropertySet* da esportare, il suo utilizzo (in riferimento a parametri di istanza o di tipo) e la classe di elemento a cui applicare le proprietà. Con delle spaziature specifiche, viene quindi

aggiunta la definizione del parametro che si vuole leggere nell'esportazione IFC e il tipo di dati da esportare.

In Figura 306 si può osservare il file .txt dove sono stati definiti i *PSet* proprietari per l'esportazione del degrado e del quadro fessurativo per la Basilica di San Benedetto.

```

#
PropertySet: ConditionAssessment I IfcBuildingElementProxy
  Tipologia di danno Text
  ID danno Text
  Parete di riferimento Text
  Data danneggiamento Text
  Area Area
#
PropertySet: ConditionAssessment I IfcBuildingElementProxy
  Tipologia di lesione Text
  ID fessura Text
  Parete di riferimento Text
  Data formazione lesione Text
  Lunghezza Length
  Localizzazione Text
#

```

Figura 306 – Property Set inseriti per l'esportazione IFC

La stessa procedura è stata eseguita per l'esportazione di tutti i parametri relativi alle prove svolte, di cui si riporta come esempio l'indagine sonica in Figura 307.

```

#
PropertySet: SonicTest I IfcBuildingElementProxy
  Immagine velocità soniche URL
  Velocità sonica massima Text
  Velocità sonica media Text
  Velocità sonica minima Text
  Tavola di riferimento URL
#

```

Figura 307 – Property Set inseriti per l'esportazione IFC

In riferimento, invece, alla classe *IfcWall* sono stati creati due *PropertySet*, uno che raccoglie le proprietà meccaniche della muratura e uno i parametri di qualità muraria, Figura 308.

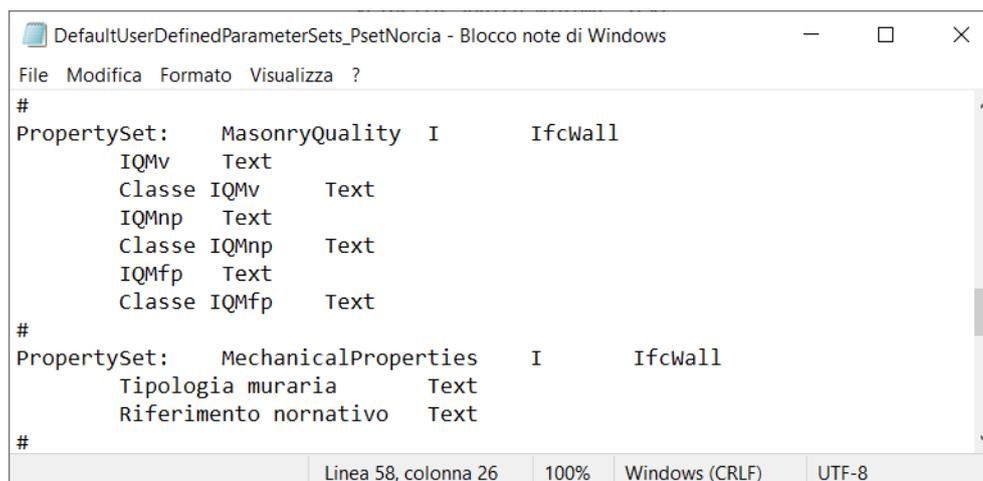


Figura 308 - Property Set inseriti per l'esportazione IFC

Dopo aver definito tutti i parametri da esportare, si può procedere con l'esportazione in formato IFC. In Figura 309 un esempio di esportazione, visualizzata tramite *software BIMVision*.

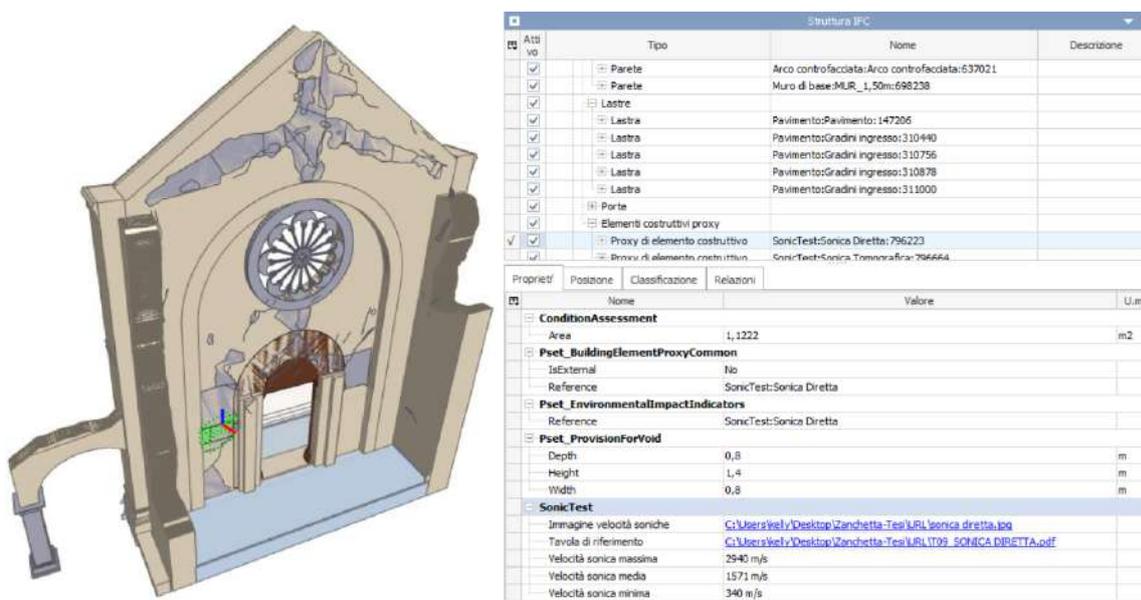


Figura 309 - Visualizzazione esportazione IFC mediante software BIMVision

9.7 Osservazioni

In conclusione a quanto spiegato in questo capitolo si può osservare come il modello creato in ambiente *Autodesk Revit* della Basilica di San Benedetto non sia un modello che è solo forma, rappresentante delle geometrie dettagliate e accurate, ma un modello che contiene delle informazioni effettive, di tipo costruttivo e storico, che si può definire H-BIM. Si può interagire nel modello, visualizzare i cambiamenti del manufatto lungo il tempo mediante appositi filtri, e quindi capire quella che è la sua evoluzione. Inoltre, è possibile interrogare il modello nel suo stato *as-damaged* e visualizzarne tutte le informazioni ad esso connesse, dalle indagini alle proprietà specifiche della muratura.

Nel caso della Basilica di San Benedetto ci si è focalizzati sulla facciata, elemento strutturale rimasto in piedi a seguito del sisma del 2016 e contenitore di diverse informazioni di indagine, come si può vedere dalle immagini riassuntive in Figura 310 e Figura 311.

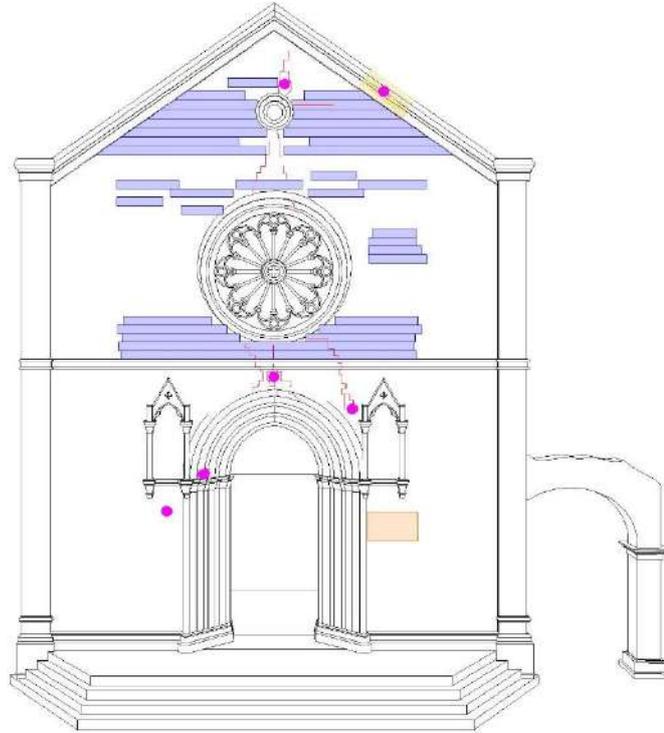


Figura 310 – Rappresentazione nel modello Revit delle indagini eseguite in facciata

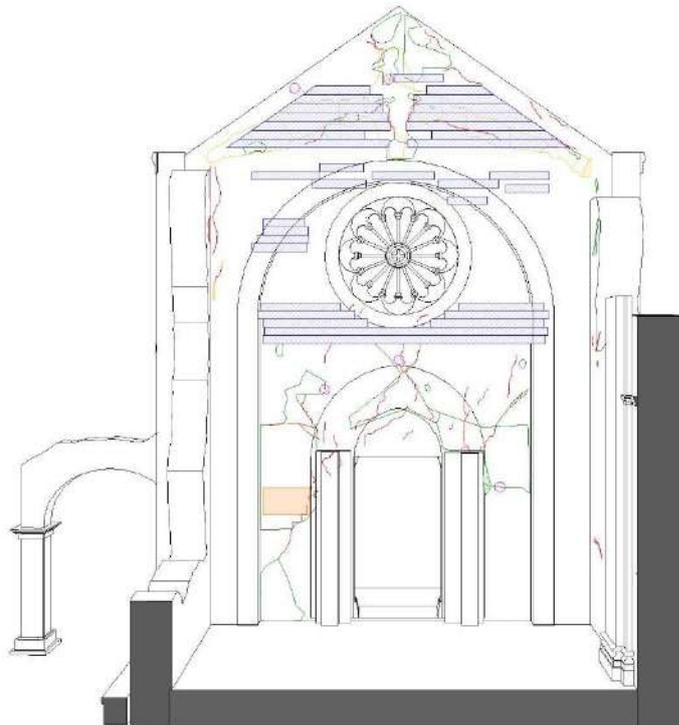


Figura 311 - Rappresentazione nel modello Revit delle indagini eseguite in controfacciata

Quello che si è cercato di ottenere è un modello informativo in ogni sua parte: ogni elemento modellato in *Autodesk Revit* ha delle informazioni specifiche che sono veicolate dall'elemento stesso. Il lavoro svolto in tesi per la Basilica di San Benedetto è solo un punto di partenza per una standardizzazione delle informazioni che possono essere contenute all'interno di un modello H-BIM.

Il primo punto importante, di necessario sviluppo, è quello già citato precedentemente: la standardizzazione di informazioni specifiche da riferire agli elementi che veicolano informazioni relative al degrado e al quadro fessurativo in generale. Quindi, avere uno standard IFC di esportazione per tutti questi elementi che non trovano riferimento in un *PSet* o addirittura in una classe di elementi dedicata.

Un altro punto fondamentale è dato dall'idea di non fermarsi alla caratterizzazione puntuale dell'elemento, ma trasferire nell'elemento che lo contiene quelle che sono le informazioni puntuali dell'elemento stesso. Ciò si può spiegare meglio con degli esempi. Prendendo in riferimento l'elemento fessura, creato nel caso in esame con una famiglia di *Modello Generico Metrico Adattivo*, essa contiene al suo interno dei parametri che vanno a descrivere o rappresentare la fessura. Questa, però, è un elemento che è presente e ben visibile agli occhi di chi osserva il modello. Quello che si vorrebbe ottenere, quindi, sarebbe trasferire tutte le informazioni presenti nell'elemento *fessura* all'interno dell'elemento *muro*, contenitore della fessura. In questo modo sarebbe il muro stesso a descrivere il suo stato, e dunque il fatto di essere fessurato, di avere una direzione prevalente delle fessure, un'area fessurata che copre poco, tutto, quasi interamente la parete, etc. Risulta necessario, quindi, studiare un *PSet* specifico che possa descrivere il quadro fessurativo della parete e perciò tradurre in parametri relativi all'elemento muro l'informazione sulla lesione. La stessa procedura si può estendere per tutte le proprietà relative alle informazioni che emergono dalle indagini. Quindi studiare delle regole di interpretazione dei dati diagnostici al fine di ricondurre i dati all'elemento tecnico muro.

Nel caso della Basilica di San Benedetto il processo si è fermato alla sola digitalizzazione puntuale di tutte le informazioni, senza la trasmigrazione di esse sull'elemento tecnico. La Basilica risulta essere un caso studio molto complesso per una standardizzazione simile. Si tratta, infatti, di una fabbrica eterogenea, con elementi molto differenziati tra di loro che non permettono una standardizzazione. In questo caso studio è difficile, dunque, individuare un processo lineare che porti poi ad avere un giudizio complessivo sull'intero edificio.

10. CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è studiata la Basilica di San Benedetto a Norcia che è stata fortemente danneggiata dallo sciame sismico che ha colpito il Centro Italia da agosto ad ottobre del 2016. Si è applicato il percorso di conoscenza nella Basilica per la valutazione della sua vulnerabilità sismica utilizzando diversi approcci di modellazione: numerica e informativa.

È stata adottata, dunque, una metodologia integrata che ha compreso l'analisi storico-documentale, una serie di indagini strumentali *in situ* e la valutazione dello stato di fatto (caratteri materici-costruttivi e quadro critico di danno). Questi sono stati necessari per la realizzazione di un modello numerico FEM, creato in ambiente DIANA FEA_{BV}, al fine di valutarne il comportamento strutturale. Tutte le informazioni sono state poi implementate all'interno di un modello informativo H-BIM realizzato in ambiente *Autodesk Revit*.

L'analisi storico documentale ha messo in luce come l'edificio in questione sia una fabbrica eterogenea composta da diverse fasi e caratterizzata da numerose modifiche che si sono susseguite dal 1300 fino agli ultimi restauri del 2000. Gli interventi che hanno coinvolto la Basilica hanno riguardato essenzialmente danni provocati a seguito di eventi sismici, tra cui è opportuno ricordare quello del 1328, i due sismi del 1703 e 1730 e quello del 1859. Le continue e ripetute modifiche per la sua riparazione o ricostruzione hanno comportato un'alterazione della struttura dell'edificio e, conseguentemente, del ruolo strutturale di ogni parte all'interno dell'edificio, aumentandone in alcuni casi la sua vulnerabilità. Si ricorda, ad esempio, la ricostruzione del campanile a seguito dei sismi settecenteschi che porta la parte sommitale del campanile ad essere accorpata su una porzione di transetto che non risulta essere ammorsata al resto della torre campanaria.

A seguito dell'analisi documentale, le indagini *in situ* sono state rilevanti per confermare le ipotesi derivanti dalla ricerca storica e talvolta utili anche ad integrare nuove informazioni.

Il prelievo di materiale legante ha permesso l'individuazione di diverse malte, raggruppabili in macrogruppi a seconda delle loro proprietà chimiche e tessiture e correlabili alle varie fasi storiche dell'edificio ipotizzate in precedenza. I campioni analizzati sono stati suddivisi in sette gruppi distinguibili che fanno riferimento a malte appartenenti ad interventi settecenteschi, malte cinquecentesche o con caratteristiche marcatamente differenti e quindi assimilabili a malte più antiche, che si possono ipotizzare essere malte trecentesche o tardo antiche.

Le prove soniche, georadar ed endoscopiche hanno portato ad una caratterizzazione più dettagliata degli elementi. I test sonici in facciata hanno evidenziato come essa sia costituita da una muratura resistente in cui le velocità soniche diminuiscono laddove sono presenti fessurazioni causate dal sisma. A seguito di prova sonica tomografica, è stato possibile supporre che queste lesioni siano passanti nella muratura, così come è stato possibile determinare una lieve differenza di qualità tra i due paramenti costituenti la facciata. Le indagini radar hanno confermato, invece, le ipotesi costruttive riguardanti la scomposizione della facciata in diverse fasi, con la ricostruzione della parte sommitale dopo il 1800, in quanto i risultati dei radargrammi sono apparsi diversi nelle due zone di indagine. Le indagini radar hanno confermato le ipotesi costruttive di abside e transetto, con trasformazioni e ispessimento del paramento murario. A seguito di georadar a pavimento è riemersa la presenza storica della scalinata di accesso alla cripta, individuata tramite vuoti. Le indagini radar, inoltre, hanno trovato corrispondenza anche con la stratigrafia muraria individuata tramite endoscopia nel foro praticato con carotaggio.

L'analisi qualitativa della muratura ha richiesto, inoltre, l'individuazione di sei porzioni murarie dove potere effettuare l'analisi della qualità muraria. L'IQM delle prime 5 porzioni murarie individuate (MUR1, MUR2, MUR3, MUR4, MUR5), confrontato con i parametri meccanici della muratura proposti in Circolare 2019, hanno permesso di classificare la muratura come una *muratura a conci sbazzati con paramenti di limitato spessore disomogeneo*. L'ultima muratura analizzata, invece, per i parametri emersi, corrisponde ad una *muratura in pietrame disordinato*. Il risultato di una muratura più scarsa può essere giustificato dal fatto che il prospetto scelto per l'analisi risulta essere in un punto sommitale del transetto e molto danneggiato dai crolli subiti. Per questo, è stata scelta come muratura caratterizzante la Basilica quella delle prime 5 porzioni murarie analizzate.

L'osservazione diretta del manufatto ha permesso di comprendere le caratteristiche dell'edificio e i danni riportati negli elementi. Grazie all'analisi visiva è stato possibile redigere un quadro fessurativo dettagliato della situazione post-sisma 30 ottobre 2016 ed è stato possibile valutare l'evoluzione del danno nei tre eventi sismici che si sono susseguiti in quell'anno, arrivando dunque a comprendere il fenomeno del crollo. Si è potuto osservare come il crollo della Basilica di San Benedetto sia partito dall'elemento più vulnerabile: il campanile. La caduta della cella campanaria verso l'interno della chiesa ha comportato il crollo della copertura e il successivo quasi totale collasso delle pareti laterali della navata, insieme al Portico delle Misure. Gli elementi che hanno resistito al sisma, quali la facciata, il basamento del campanile e la zona absidale, sono stati messi in sicurezza nell'immediato post-sisma. In essi sono comunque visibili delle fessurazioni significative come, ad esempio, la lesione che attraversa in diagonale il campanile e lascia presumere un meccanismo di ribaltamento di quella porzione, la lesione a croce presente in controfacciata o le lesioni diffuse presenti nella zona absidale.

Al fine di valutare dal punto di vista strutturale la Basilica è stata eseguita una modellazione ad elementi finiti in ambiente DIANA FE_{BV}. Tutte le informazioni raccolte nella fase di conoscenza sono state utili, dunque, per la realizzazione del modello numerico FEM. Le analisi eseguite hanno reso possibile la valutazione della vulnerabilità della Basilica e la comprensione dei meccanismi di danno che si sono attivati a seguito del sisma. Innanzitutto, sono state eseguite un'analisi statica

lineare e un'analisi modale. Queste hanno permesso una valutazione della corretta modellazione della Basilica tramite confronto, ad esempio, delle reazioni vincolari delle tensioni alla base di campanile e facciata con il calcolo analitico. L'analisi statica non lineare ha permesso, invece, l'individuazione dei meccanismi di rottura nel modello e il loro confronto con i danni visibili. Si è potuto osservare come tutti i meccanismi emersi dalle analisi avessero un effettivo riscontro con il danno verificatosi a seguito del sisma del 2016. Tra questi si ricorda, anche in questo caso, la formazione della fessura a croce in controfacciata, il fenomeno di distacco del campanile dalla parete del transetto, la rotazione della sua parte sommitale o ancora la corrispondenza del quadro fessurativo sia per quanto riguarda la fessura che attraversa il campanile in diagonale sino ad arrivare al basamento, sia per la lesione al di sotto della cella campanaria. Tutti i meccanismi citati si sono potuti osservare a seguito di indagine visiva *in situ*.

Tutto il lavoro di tesi, fin dalle prime fasi, è stato portato avanti parallelamente alla realizzazione di un modello informativo H-BIM della Basilica, con lo scopo di essere un contenitore di tutte quelle informazioni che permettono la conoscenza dell'intero edificio. Si è creato, quindi, un modello in ambiente *Autodesk Revit* della Basilica di San Benedetto. Questo modello non è solo forma, rappresentante delle geometrie dettagliate e accurate, ma un modello contenente delle informazioni effettive, di tipo costruttivo e storico, ricavate in fase di conoscenza dell'edificio. Il modello è utile per la visualizzazione delle modifiche avvenute nel corso dei secoli nella Basilica di San Benedetto e per l'individuazione progressiva del quadro fessurativo, fino ad arrivare alla modellazione *as-damaged* dello stato di fatto.

Punto focale della rappresentazione H-BIM è stata la digitalizzazione di tutti gli elementi contenuti nel modello, quali ad esempio il degrado, le fessure, le prove effettuate e le caratteristiche stesse della muratura. Al fine di portare un esempio di questo lavoro di digitalizzazione si è scelta la facciata della Basilica, rappresentativa di tutte le informazioni sopra citate. Agli elementi creati come *Famiglie di Modello Generico* all'interno del modello sono stati attribuiti dei parametri che hanno permesso, quindi, il passaggio da un LOD F ad un LOD G e l'implementazione di tutte le informazioni che si avevano a disposizione riguardanti la Basilica all'interno del modello. Quello, dunque, che si è cercato di ottenere è un modello informativo in ogni sua parte: ogni elemento modellato in *Autodesk Revit* ha delle informazioni specifiche che sono veicolate dall'elemento stesso. Si è poi proceduto con un'esportazione IFC in modo tale da ottenere un file aperto di interscambio tra diversi *software*, uno tra gli scopi principali di un modello BIM.

Il percorso che si è affrontato, quindi, è stato l'utilizzo di una metodologia integrata al fine di giungere ad una buona conoscenza della Basilica, che ha permesso la realizzazione di due modelli: uno strutturale e uno informativo. Il primo risulta necessario al fine di raggiungere l'obiettivo della valutazione della vulnerabilità della Basilica e il secondo utile al fine di raccogliere tutti i dati osservati.

Un possibile sviluppo futuro nell'ambito della modellazione strutturale è dato dalla realizzazione di un modello ad elementi discreti (DEM) e il confronto dei risultati con quelli emersi a seguito di modellazione ad elementi finiti (FEM) realizzata in questo lavoro di tesi.

Nell'ambito dell'H-BIM un possibile sviluppo futuro è dato dall'idea di poter proseguire il processo di digitalizzazione delle informazioni a disposizione passando da una caratterizzazione puntuale di ogni singolo componente ad una caratterizzazione del sistema contenente l'elemento stesso in modo, ad esempio, che sia la parete stessa a dare informazioni sull'elemento *fessura* ad essa associato. Questo processo può essere esteso a tutti gli elementi contenuti all'interno del modello studiando delle regole di interpretazione dei dati diagnostici al fine di ricondurre i dati all'elemento tecnico muro. Attraverso la traslazione delle informazioni puntuali dei singoli elementi all'elemento tecnico che le contiene, si possono creare delle relazioni che, mediante lo sviluppo di un modello analitico, potrebbero portare anche alla definizione di un *giudizio* sull'elemento tecnico o sull'intero edificio. Tuttavia, essendo la Basilica un edificio molto complesso per potere studiare un processo lineare che porti a questa standardizzazione, viene lasciata aperta la questione come punto di sviluppo futuro.

BIBLIOGRAFIA

- Angeli S. (2019). *Norcia. Scenari per la rigenerazione della città*, Politecnico di Milano, Tesi di Laurea Magistrale.
- Bacchetto A. (2006). *Introduzione al metodo degli elementi finiti e alla modellazione FEM*.
- Beolchini G. C., Milano L., Antonacci E. (2005), *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura – Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura*, Volume II – Parte 1. Convenzione di Ricerca con la Regione Marche. Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Tecnologia delle Costruzioni – Sede dell'Aquila.
- Bertolaso G., Boschi E., Guidoboni E., Ferrari G., Castenetto S., Mariotti D., Valensise G. (2007). *I terremoti dell'Appennino umbro-marchigiano. Area centrale e meridionale dal I secolo aC al 2000*. INGV, SGA, Dipartimento Protezione Civile.
- Fondo Reguardati. Biblioteca Comunale Norcia, *Perzia della Chiesa, Monistero, Grancie ed altre chiese annesse alla Badia di San Benedetto protettore di Norcia e Contado*
- Binda L., Roberti G. M., Tiraboschi C. (1996). *Problemi di misura dei parametri meccanici della muratura e dei suoi componenti*. Atti del Convegno Nazionale La Meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto, Messina.
- Binda L., Gambarotta L., Lagomarsino S., Modena C., (1999). *A multilevel approach to the damage assessment and seismic improvement of masonry buildings in Italy*. Seismic damage to masonry buildings, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Binda L., Saisi A. (2003). *Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale*. DIS, Dipartimento di ingegneria strutturale, Politecnico di Milano.
- Binda L., Cardani G., Saisi A. E. (2009). *Caratterizzazione sperimentale della qualità muraria*. In XIII Congresso ANIDIS–L'Ingegneria Sismica in Italia, pp. 1-10.

-
- Binda L., Borri A., Cardani G., Doglioni F. (2009a). *Scheda qualità muraria: relazione finale e linee guida per la compilazione della scheda di valutazione della qualità muraria*. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS).
- Borin P. (2015). *BIM per il patrimonio culturale architettonico: sperimentazione per la chiesa degli Eremitani a Padova*
- Borri A., De Maria A. (2009). *Indice di qualità muraria (IQM). Applicazioni nell'ambito delle NTC 2008*, in "L'Edilizia", vol. 16, pp. 46-57
- Borri A., Paci G., De Maria A. (2011). *Resistenza a taglio delle murature: prove diagonali e correlazione con l'Indice di Qualità Muraria IQM*. XIV convegno ANIDIS. L'ingegneria sismica in Italia. Sommari, relazioni ad invito, atti su dvd. Bari, pp. 18-22.
- Borri A., De Maria A. (2015). *Indice di Qualità Muraria (IQM): correlazione con le caratteristiche meccaniche e livelli di conoscenza. Progettazione sismica*.
- Borri A., De Maria A. (2019). *Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019*, 2-21.
- Borzi B., Faravelli M., Polli D. A. (2018). *Central Italy sequence: simulated damage scenario for the main shocks of 2016*. Bull Earthq Eng. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0378-9>
- Cazzani A., Stochino F. (2017). *Statica per l'Edilizia Storica, i materiali costituenti la muratura*. Università degli Studi di Cagliari, Corso di Laurea Magistrale in Architettura. https://people.unica.it/antoniocazzani/files/2014/03/Statica_per_edilizia_storica_02-2017.pdf
- Cescatti E., Deiana R., Rosato L., Modena, C. (2015). *Evaluation of injection intervention on real case in a medieval complex*. In 12th North American Masonry Conference, pp. 17-20.
- Cescatti E. (2016). *Combined experimental and numerical approaches to the assessment of historical masonry structures*, Università di Trento, Tesi di Dottorato.
- Cescatti E., Rosato L., Valluzzi M. R., Casarin F. (2019). *An automatic algorithm for the execution and elaboration of Sonic Pulse Velocity*, Tests in direct and tomographic arrangements Structural Analysis of Historical Constructions pp 716-724, Springer.
- Cescatti E., Salzano P., Casapulla C., Ceroni F., da Porto F., Prota A. (2020). *Damages to masonry churches after 2016–2017 Central Italy seismic sequence and definition of fragility curves*. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(1), 297-329.
- Comino C., Lambrenghi F. (2013). *"Seicento Inedito" L'ultima età dell'oro della Città di Norcia*.
- Cordella R. (2002). *Norcia, Guida Storico Artistica*
- Cordella R. (1978), *Guida di Norcia e del suo Territorio*, Norcia
-

- Da Porto F., Cescatti E., Deiana R., Secco M., Pagan K. (2020). *Relazione sulle indagini. Convenzione per attività di studio e di indagine della Basilica di San Benedetto*, Centro Interdipartimentale CIRCe, Università degli Studi di Padova
- De Carolis P. (1703). *Relazione generale delle rovine e mortalità cagionate dalle scosse del Terremoto de' 14 Gennaio e 2 Febbraio 1703 in Norcia, e Cascia, e loro contadi*.
- De Matteis G., Zizi M., Corlito V. (2017). *Analisi preliminare degli effetti del terremoto del Centro Italia del 2016 sulle chiese a una navata*. Proceedings of the Associazione Nazionale Italiana Di Ingegneria Sismica.
- Desnoues G., Guglielmini D. (1706), *Drawing of the Piazza di S. Benedetto*
- Doglioni F., Mirabella Roberti G., (2003). *Prove sperimentali speditive e valutazioni di vulnerabilità delle murature*. In Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Istituto Centrale del Restauro, Monumenti e terremoti. Nuove esperienze di analisi di vulnerabilità-pericolosità sismica. Risultati del programma ENEA-MIUR. MondoGIS, Roma 2003, pp. 93-106.
- Doglioni F., Moretti A., Petrini V. (1994). *Le chiese e il terremoto: dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*. Gruppo nazionale per la difesa dai terremoti
- Eastman C. M., Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. (2011). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. John Wiley & Sons.
- Estefanía Chaves Moreno A. (2019). *Seismic analysis of two churches in Castelsantangelo sul Nera (MC) damaged by the Centre of Italy 2016 earthquake*, Università degli Studi di Padova, Tesi Master in Structural Analysis Of Monuments And Historical Constructions
- Fioretti A.M., Carampin R., (2009). *Laboratorio Microsonda Elettronica*, <http://geo.geoscienze.unipd.it/sites/default/files/Introduzione%20alla%20Microanalisi.pdf>
- Gigliozzi M.T. (2019). *Norcia Città Sismica. La Basilica di San Benedetto paradigma di rinascite*, Saggi di Storia dell'Arte, Campisano editore, Roma
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018). *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). doi: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>
- Iraci Sareri, G. (2018). *Modelli numerici per l'analisi sismica di edifici in muratura colpiti dal sisma Centro Italia 2016: confronto tra metodi ad elementi finiti ea telaio equivalente*, Tesi di Laurea in "Ingegneria Edile-Architettura", Università degli studi di Padova, a.a. 2017-2018
-

- Jing, L. (2003). *A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(3), 283-353.
- Klein C. (2004). *Mineralogia*, Zanichelli, Bologna
- Lagomarsino S., Podestà S. (2004). *Seismic vulnerability of ancient churches: I. Damage assessment and emergency planning*; Earthquake Spectra, n. 20: pp. 377–394.
- Lauro G. (1635). *Historia e Pianta della Città di Norsia*
- López F. J., Leronés P. M., Llamas J., Gómez-García-Bermejo J., Zalama E. (2018). *A review of heritage building information modeling (H-BIM)*. Multimodal Technologies and Interaction, 2(2), 21.
- Lourenço P. B. (1998). *Experimental and numerical issues in the modelling of the mechanical behaviour of masonry*.
- Lourenço P. B. (2002). *Calcoli su strutture storiche in muratura*. Progressi in ingegneria strutturale e materiali, 4 (3), 301-319.
- Lourenço P.B. (2009). *Recent advances in masonry modeling: micromodelling and homogenisation*. In: U. A. M. H. Galvanetto, ed. Multiscale Modeling in Solid Mechanics: Computational Approaches. London: Imperial College Press
- Modena C., Rossi P.P., Zonta D. (1997). *Static and dynamic investigation on the roman amphitheatre (Arena) in Verona*, Intern. Colloquium IABSE, May 1997, Bergamo.
- Murphy M., McGovern E., Pavia S. (2009). *Historic building information modelling (HBIM)*. Structural Survey.
- Orlandini G. (2015), *Building pathology information through BIM technology A framework for information management*, Tesi di Laurea Magistrale in “Ingegneria Edile-Architettura”, Università degli studi di Padova.
- Paparella R., Zanchetta C. (2020). *BIM & Digitalizzazione del Patrimonio Immobiliare*. Società Editrice Esculapio, pag. 83.
- Penna A., Calderini C., Sorrentino L., Carocci C. F., Cescatti E., Sisti R., Prota A. (2019). *Damage to churches in the 2016 central Italy earthquakes*. Bulletin of earthquake engineering, 17(10), 5763-5790. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00594-4>
- Pistilli A. (2016). *Datazione al radiocarbonio di malte storiche: messa a punto di un protocollo di purificazione del legante*, Università degli Studi di Padova, Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica.

-
- Rietveld H.M. (1969), *A profile refinement method for nuclear and magnetic structures*, Journal of Applied Crystallography, 2, pp. 65-71
- Rosato L. (2014), *Sviluppo di un nuovo software di elaborazione tomografica per l'applicazione del metodo di indagine sonica per la diagnosi strutturale delle murature esistenti*, Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile-Architettura, Università degli Studi di Padova
- Secco M., Dilaria S., Addis A., Bonetto J., Artioli G., Salvadori M. (2018). *The Evolution of the Vitruvian Recipes over 500 Years of Floor-Making Techniques: The Case Studies of the Domus delle Bestie Ferite and the Domus di Tito Macro (Aquileia, Italy)*, Archaeometry, 60 (2), pp. 185-206
- Secco M., Previato C., Addis A., Zago G., Kamsteeg A., Dilaria S., Canovaro C., Artioli G. Bonetto J. (2019). *Mineralogical clustering of the structural mortars from the Sarno Baths complex in Pompeii: a tool to interpret construction techniques and relative chronologies*, Journal of Cultural Heritage, 40, pp. 265-273
- Simeone D., Corsi S., Acierno M. (2019). BIM semantic-enrichment for built heritage representation. *Automation in Construction*, 97, 122-137.
- Speakman S. A. (2011). *Basics of X-ray powder diffraction*. Massachusetts-USA
- Valluzzi M.R. (2019), *Dispense del Corso di Restauro e Laboratorio* (UniPD) a.a. 2019-2020
- Volk R., Stengel J., Schultmann F. (2014). *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings—Literature review and future needs*. *Automation in construction*, 38, 109-127

RIFERIMENTI DOCUMENTAZIONE TECNICA

- AIA Document G202™ (2013), *Project Building Information Modeling Protocol Form*
- Archivio Centrale dello Stato (ACS), fondo Ministero della Pubblica Istruzione, Direzione Generale Antichità e Belle Arti
- Archivio SABAP, *Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio dell'Umbria*, Comune di Norcia
- Archivio Storico Comunale di Norcia (ASCN), Carteggio Amministrativo
- Circolare 2019, *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*. CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP
- DBMI15, *Database Macrosismico Italiano*, <https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

DIANA FEA ^{BV} 2020, *User's Manual 10.4*

DIP 2020, Iannelli P. (2020), *Documento di indirizzo alla progettazione per l'intervento di recupero della Basilica di San Benedetto a Norcia*, Ufficio del Soprintendente Speciale per le aree colpite dal sisma del 24 agosto 2016

Gruppo di Lavoro (2004), *Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003*. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma

ICCD, *Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione*, Ministero per i Beni e le attività Culturali, Roma

INGV (2016a), *Relazione di dettaglio: Rieti Mw 6.0 del 2016-08-24 01:36:32 UTC*

INGV (2016b), *Relazione di dettaglio: Macerata Mw 5.9 del 2016-10-26 19:18:05 UTC*

INGV (2016c), *Relazione di dettaglio: Perugia Mw 6.5 del 2016-10-30 06:40:17 UTC*

ISO 16739:2013. *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries*

LL.GG.BB.CC., (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 (09/02/2011)*. Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, 9 febbraio 2011.

Mappa di Pericolosità Sismica del territorio nazionale, INGV – Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://zonesismiche.mi.ingv.it>)

NTC 2018. Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 Min. Infrastrutture e Trasporti, 2018. D.M.17.01.2018, *Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*. Suppl. Ord. alla G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018.

ReLuis (2008), Milano, L., Mannella, A., Morisi, C., & Martinelli, A. *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*. Allegato alle Linee Guida per la Riparazione e il Rafforzamento di elementi strutturali, Tamponature e Partizioni.

UNI 11176:2006. *Beni culturali - Descrizione petrografica di una malta*

UNI 11182:2006. *Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Descrizione della forma di alterazione - Termini e definizioni*

UNI 11337-4:201. *Edilizia e opere di ingegneria civile - Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni - Parte 4: Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti*

SITOGRAFIA

<https://www.geoscienze.unipd.it/diffrattometria-x-polveri>

<https://www.geoscienze.unipd.it/laboratori/laboratori/laboratorio-di-microscopia-elettronica-scansione-sem>

<http://zonesismiche.mi.ingv.it>

<https://www.infobuild.it/approfondimenti/bim-rivoluzione-digitale-edilizia-building-information-modeling/>

<https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/>

<https://www.01building.it/bim/lod-progettazione-bim/>

<https://assoacmi.it/wp-content/uploads/2017/07/UNI11337-Pavan.pdf>

<https://it.linkedin.com/pulse/i-lod-livelli-di-dettaglio-nel-bim-spiegati-bene-edoardo-pruneri>

<https://www.buildingsmartitalia.org/standard/standard-bs/industry-foundation-classes-ifc/>

<https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcobjectdefinition/>

<https://bim.acca.it/architettura-file-ifc-ifcrelationship/>

<https://bim.acca.it/ifc-property-definition/>

APPENDICE

A - TABELLE TEMPI DI VOLO PROVE SONICHE

PROVA SONICA DIRETTA

Tabella dei tempi di volo e delle velocità relative a ciascun punto di battuta

PROVA SONICA DIRETTA						
Percorso	Spessore Muratura [m]	Tempo di volo (sec)			T _m (sec)	V _m (m/s)
		T _a [sec]	T _b [sec]	T _c [sec]		
1.1	1.16	5.94E-04	4.91E-04	4.95E-04	5.27E-04	2203
1.2	1.16	4.46E-04	4.44E-04	5.20E-04	4.70E-04	2468
1.3	1.16	3.72E-04	3.83E-04	3.88E-04	3.81E-04	3045
1.4	1.16	4.88E-04	4.54E-04	4.69E-04	4.70E-04	2466
1.5	1.16	5.47E-04	5.70E-04	4.57E-04	5.25E-04	2211
1.6	1.16	6.06E-04	6.54E-04	6.73E-04	6.44E-04	1800
1.7	1.16	6.85E-04	7.36E-04	7.59E-04	7.27E-04	1596
1.8	1.16	8.40E-04	9.92E-04	8.16E-04	8.83E-04	1314
2.2	1.16	5.68E-04	5.09E-04	4.82E-04	5.20E-04	2232
2.3	1.16	5.19E-04	4.72E-04	5.73E-04	5.21E-04	2225
2.4	1.16	5.09E-04	4.83E-04	4.49E-04	4.80E-04	2415
2.5	1.16	7.97E-04	6.99E-04	6.41E-04	7.12E-04	1628
2.6	1.16	8.06E-04	7.40E-04	6.44E-04	7.30E-04	1589
2.7	1.16	9.18E-04	9.91E-04	8.24E-04	9.11E-04	1273
2.8	1.16	8.01E-04	8.97E-04	7.61E-04	8.20E-04	1415
3.1	1.16	5.08E-04	5.27E-04	5.66E-04	5.34E-04	2174
3.2	1.16	5.77E-04	6.96E-04	5.91E-04	6.21E-04	1867
3.3	1.16	6.55E-04	6.15E-04	6.96E-04	6.55E-04	1770
3.4	1.16	7.37E-04	8.89E-04	7.45E-04	7.90E-04	1468
3.5	1.16	7.46E-04	8.91E-04	9.06E-04	8.48E-04	1368
3.6	1.16	1.07E-03	1.08E-03	9.83E-04	1.04E-03	1114
3.7	1.16	1.64E-03	1.39E-03	1.31E-03	1.45E-03	801
3.8	1.16	9.92E-04	1.24E-03	1.09E-03	1.11E-03	1046
4.1	1.16	7.15E-04	5.72E-04	6.55E-04	6.47E-04	1792
4.2	1.16	5.67E-04	6.05E-04	6.82E-04	6.18E-04	1877
4.3	1.16	6.59E-04	7.44E-04	7.03E-04	7.02E-04	1652
4.4	1.16	8.30E-04	7.23E-04	8.60E-04	8.04E-04	1442
4.5	1.16	9.08E-04	9.83E-04	1.02E-03	9.72E-04	1194
4.6	1.16	1.24E-03	1.31E-03	1.39E-03	1.32E-03	881
4.7	1.16	1.57E-03	1.48E-03	1.58E-03	1.54E-03	753
4.8	1.16	1.00E-03	9.57E-04	1.07E-03	1.01E-03	1150
5.1	1.16	4.96E-04	4.45E-04	5.08E-04	4.83E-04	2402
5.2	1.16	2.19E-03	2.01E-03	2.05E-03	2.08E-03	558
5.3	1.16	9.04E-04	9.34E-04	7.81E-04	8.73E-04	1329
5.4	1.16	9.69E-04	9.53E-04	1.06E-03	9.93E-04	1169
5.5	1.16	1.08E-03	1.31E-03	1.11E-03	1.17E-03	995
5.6	1.16	1.11E-03	1.04E-03	1.27E-03	1.14E-03	1018
5.7	1.16	1.47E-03	1.56E-03	1.54E-03	1.52E-03	762
5.8	1.16	1.31E-03	1.52E-03	1.48E-03	1.43E-03	810

PROVA SONICA TOMOGRAFICA

Tabella dei tempi di volo di ciascuna traiettoria investigata

PROVA TOMOGRAFICA												
Pt. di battuta	Pt. di ricezione	Tempo di volo (sec)				T _m [sec]	Pt. di battuta	Pt. di ricezione	Tempo di volo (sec)			T _m [sec]
		T _a [sec]	T _b [sec]	T _c [sec]	T _a [sec]				T _b [sec]	T _c [sec]		
1.1	3.1	4.60E-04	4.60E-04	4.60E-04	4.60E-04	1.5	3.1	6.60E-04	6.60E-04	6.60E-04	6.60E-04	
1.1	3.2	5.00E-04	5.20E-04	5.00E-04	5.07E-04	1.5	3.2	6.40E-04	6.20E-04	6.20E-04	6.27E-04	
1.1	3.3	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	1.5	3.3	5.80E-04	5.80E-04	5.80E-04	5.80E-04	
1.1	3.4	5.20E-04	5.20E-04	5.40E-04	5.27E-04	1.5	3.4	5.40E-04	5.40E-04	5.20E-04	5.33E-04	
1.1	3.5	6.40E-04	6.60E-04	6.40E-04	6.47E-04	1.5	3.5	6.60E-04	6.80E-04	6.60E-04	6.67E-04	
1.1	3.6	8.80E-04	8.80E-04	8.80E-04	8.80E-04	1.5	3.6	8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	
1.1	3.7	1.22E-03	1.22E-03	1.24E-03	1.23E-03	1.5	3.7	9.40E-04	9.60E-04	9.60E-04	9.53E-04	
1.2	3.1	4.80E-04	4.80E-04	4.80E-04	4.80E-04	1.6	3.1	8.00E-04	8.00E-04	8.00E-04	8.00E-04	
1.2	3.2	4.80E-04	5.20E-04	4.80E-04	4.93E-04	1.6	3.2	7.80E-04	7.80E-04	8.00E-04	7.87E-04	
1.2	3.3	4.60E-04	5.00E-04	4.80E-04	4.80E-04	1.6	3.3	7.20E-04	7.20E-04	7.40E-04	7.27E-04	
1.2	3.4	4.60E-04	4.80E-04	4.60E-04	4.67E-04	1.6	3.4	6.20E-04	6.00E-04	6.20E-04	6.13E-04	
1.2	3.5	5.80E-04	6.20E-04	5.80E-04	5.93E-04	1.6	3.5	7.00E-04	6.80E-04	6.80E-04	6.87E-04	
1.2	3.6	8.00E-04	8.60E-04	8.20E-04	8.27E-04	1.6	3.6	8.60E-04	8.60E-04	8.40E-04	8.53E-04	
1.2	3.7	1.16E-03	1.22E-03	1.18E-03	1.19E-03	1.6	3.7	7.80E-04	7.80E-04	7.80E-04	7.80E-04	
1.3	3.1	4.60E-04	4.60E-04	4.60E-04	4.60E-04	1.7	3.1	9.60E-04	9.40E-04	9.40E-04	9.47E-04	
1.3	3.2	4.40E-04	4.40E-04	4.40E-04	4.40E-04	1.7	3.2	9.40E-04	9.20E-04	9.20E-04	9.27E-04	
1.3	3.3	4.40E-04	4.20E-04	4.20E-04	4.27E-04	1.7	3.3	9.00E-04	8.60E-04	8.60E-04	8.73E-04	
1.3	3.4	4.20E-04	4.00E-04	4.00E-04	4.07E-04	1.7	3.4	7.20E-04	7.40E-04	6.80E-04	7.13E-04	
1.3	3.5	5.40E-04	5.20E-04	5.20E-04	5.27E-04	1.7	3.5	8.00E-04	7.80E-04	7.80E-04	7.87E-04	
1.3	3.6	6.00E-04	5.80E-04	5.60E-04	5.80E-04	1.7	3.6	7.80E-04	8.20E-04	8.20E-04	8.07E-04	
1.3	3.7	1.00E-03	1.02E-03	1.02E-03	1.01E-03	1.7	3.7	7.40E-04	7.00E-04	7.00E-04	7.13E-04	
1.4	3.1	5.60E-04	5.60E-04	5.60E-04	5.60E-04	1.8	3.1	1.18E-03	1.20E-03	1.26E-03	1.21E-03	
1.4	3.2	5.40E-04	5.40E-04	5.40E-04	5.40E-04	1.8	3.2	1.12E-03	1.18E-03	1.16E-03	1.15E-03	
1.4	3.3	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	5.00E-04	1.8	3.3	1.08E-03	1.14E-03	1.08E-03	1.10E-03	
1.4	3.4	4.60E-04	4.60E-04	4.60E-04	4.60E-04	1.8	3.4	9.80E-04	1.02E-03	9.80E-04	9.93E-04	
1.4	3.5	6.40E-04	6.40E-04	6.00E-04	6.27E-04	1.8	3.5	9.20E-04	9.00E-04	9.20E-04	9.13E-04	
1.4	3.6	8.60E-04	8.40E-04	8.60E-04	8.53E-04	1.8	3.6	9.20E-04	8.80E-04	8.80E-04	8.93E-04	
1.4	3.7	1.08E-03	1.10E-03	1.10E-03	1.09E-03	1.8	3.7	8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	8.40E-04	

B - SCHEDE DI QUALITÀ MURARIA

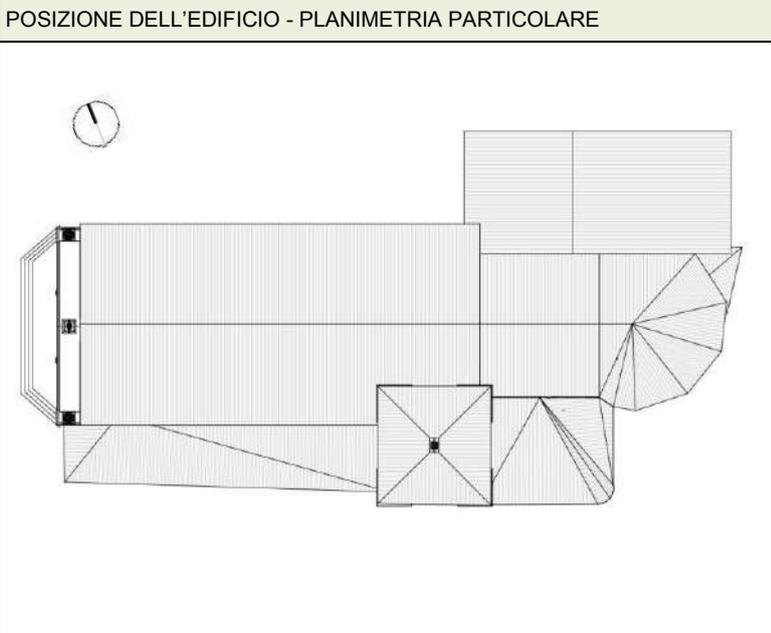
SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILIEVO DELLA TIPOLOGIA E DELLA QUALITÀ DELLA MURATURA

Parte prima

1. UBICAZIONE / IDENTIFICAZIONE		Spazio riservato					
		<i>Codici ISTAT</i>					
Regione	UMBRIA	1 0	Aggregato n°		N° Paramenti		
Provincia	PERUGIA	0 5 4	Edificio n°		N° Sezioni		
Comune	NORCIA	0 3 5	Data	/ /			
Fraz./Loc.	NORCIA		DATI CATASTALI Foglio			Allegato	
Indirizzo	PIAZZA SAN BENEDETTO		Particelle				
	N° Civico		Coordinate geografiche (ED50 – UTM 32-33)				
Sezione Censuaria			E	1 3 0 5 0 6 . 2	Fuso		
Denominazione	BASILICA DI SAN BENEDETTO DI NORCIA		N	4 2 4 7 3 2 . 4			
			Epoca di costruzione	<input type="checkbox"/> <1919	<input type="checkbox"/> '19÷'45	<input type="checkbox"/> '46÷'61	<input type="checkbox"/> '61÷'71
				<input type="checkbox"/> '72÷'81	<input type="checkbox"/> '82÷'91	<input type="checkbox"/> '92÷'01	<input checked="" type="checkbox"/> <1300



Scala : 1: 1000



Scala : 1:500

FOTO EDIFICIO



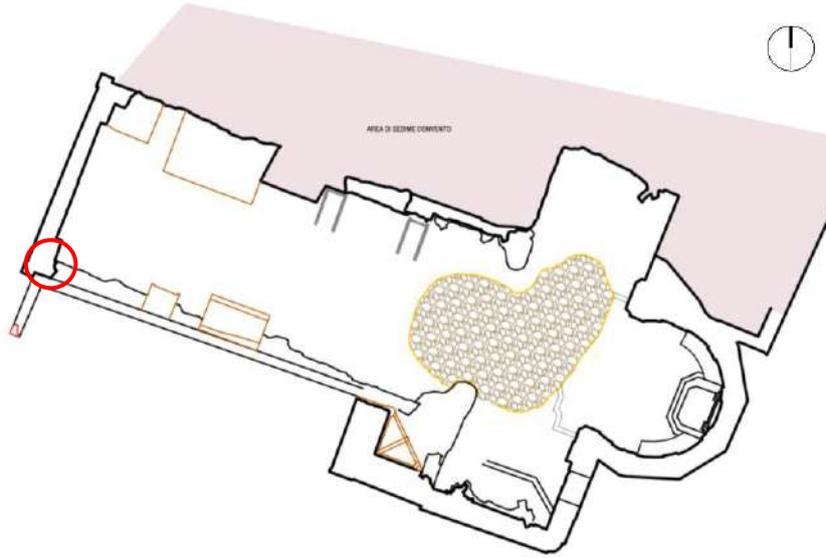
[FOTO PRE SISMA 2016]

FOTO EDIFICIO



[FOTO POST SISMA 2016]

POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELLA PIANTA DELL'EDIFICIO



PIANTA STATO DI FATTO – scala 1:500

POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELL'EDIFICIO

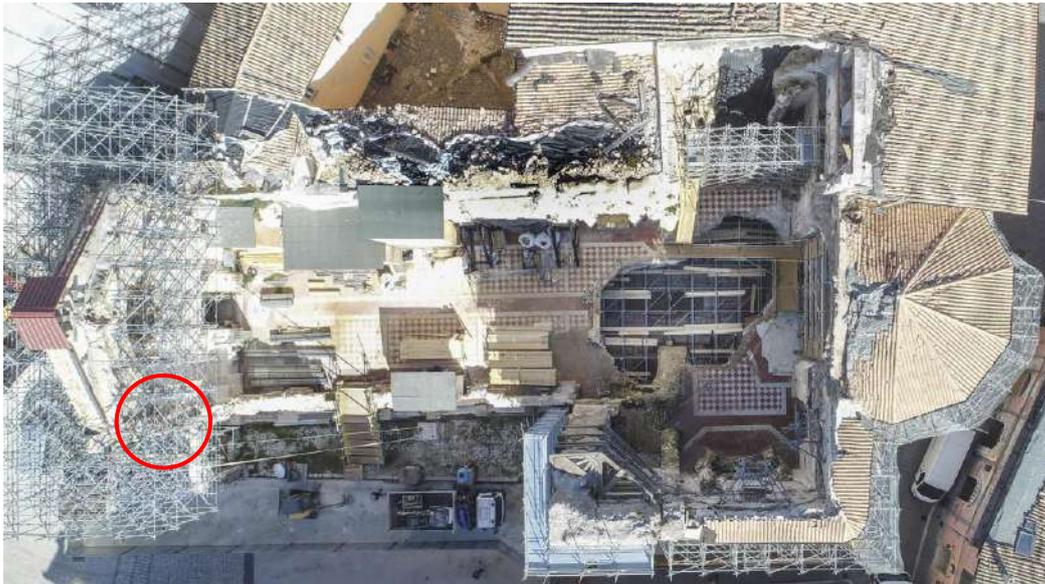


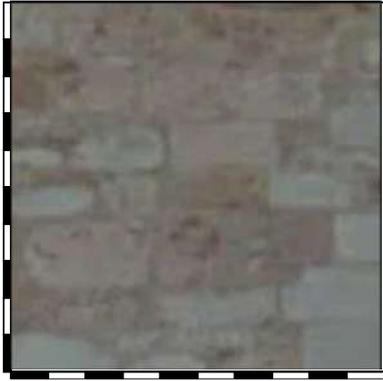
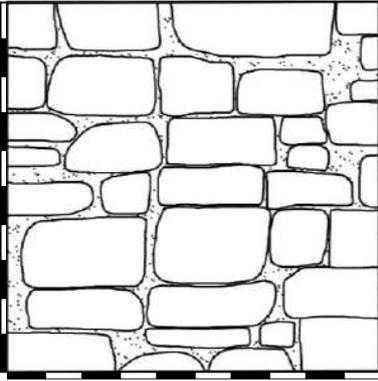
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1

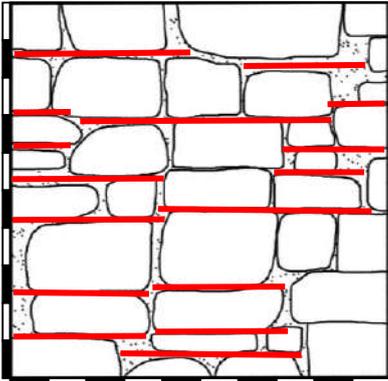


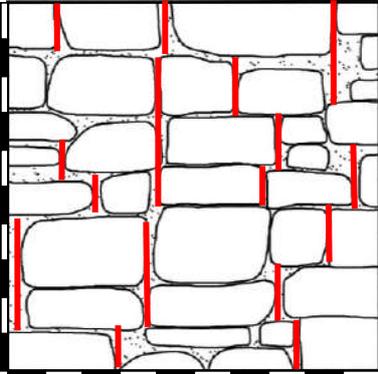
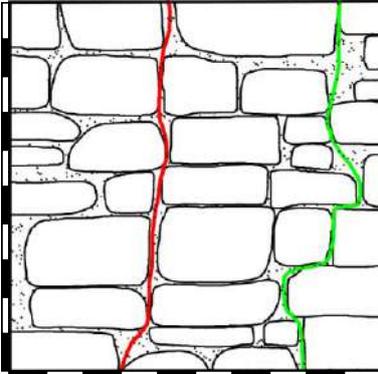
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1



2. TESSITURA DEL PARAMENTO **Parte seconda**

		<p>Foto e disegni scala 1:20</p> <p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pietre Vuoti Mattoni Intonaco Malta Vegetazione
---	--	---

<p>2.1 RUOLO STRUTTURALE</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Muratura d'ambito <input type="checkbox"/> Muratura di spina <input type="checkbox"/> Pilastro <input type="checkbox"/> Tamponamento <input type="checkbox"/> Muratura interna</p>	<p>2.2 TIPOLOGIA</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Pietra <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/> Mattoni <input type="checkbox"/> Blocchi di tufo <input type="checkbox"/> Blocchi di cls <input type="checkbox"/> Mista</p>	<p>2.6 APPARECCHIATURA / ORIZZONTALITÀ DEI FILARI</p> <p><input type="checkbox"/> Irregolare (Orizzontamenti NR) <input checked="" type="checkbox"/> A corsi sub-orizzontali (Orizzontamenti PR) <input type="checkbox"/> A corsi orizzontali (Orizzontamenti R)</p> <div style="text-align: right;">  </div>
<p>2.3 RICORSI</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/> In elementi più grandi <input type="checkbox"/> In mattoni <input type="checkbox"/> In cls</p>	<p>2.4 ORIZZONT./ LISTATURE</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p>2.5 ZEPPE</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> In pietra <input type="checkbox"/> In cotto</p>	

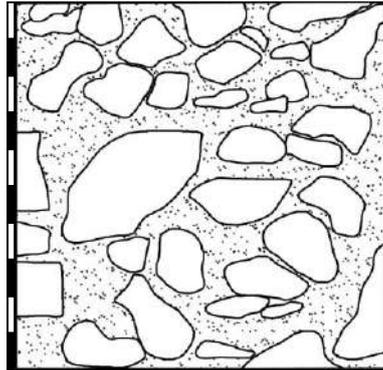
<p>2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (S.G. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (S.G. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (S.G. R)</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>OSSERVAZIONI</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 113,2 cm. È presente, quindi, un cattivo ingranamento nel piano delle pareti.</p>
--	--

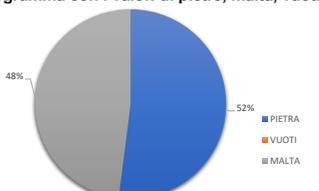
3. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DEL PARAMENTO

3.1 ELEMENTI LAPIDEI			
<p>3.1.1 Tipo di Elemento</p> <p><input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare <input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo <input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro _____</p>	<p>3.1.2 Provenienza</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale <input type="checkbox"/> Greto del fiume <input type="checkbox"/> Cava</p>	<p>3.1.3 Lavorazione</p> <p><input type="checkbox"/> Assente <input type="checkbox"/> Appena sbazzata <input checked="" type="checkbox"/> Spigoli finiti e faccia vista non lavorata</p>	<p>3.1.4 Stato di conservazione</p> <p><input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre <input type="checkbox"/> Cattivo <input checked="" type="checkbox"/> Pessimo</p>
<p>3.1.5 Regolarità (forma) degli elementi</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)</p>	<p>3.1.6 Dimensioni degli elementi</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL.) < 15 cm <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (D.EL.) 15 cm + 25 cm <input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL.) > 25 cm</p>		

3.2 MALTA		3.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza
<p>3.2.1 Funzione</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura <input type="checkbox"/> Rimpimento</p> <p>3.2.2 Consistenza</p> <p><input type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile <input checked="" type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace</p> <p>3.2.3 Colore malta GRIGIASTRO/ROSA</p>	<p>3.2.5 Tipo di aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto <input type="checkbox"/> Ghiaia</p> <p>3.2.6 Forma dell'aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Arrotondata <input checked="" type="checkbox"/> Spigolosa</p> <p>3.2.4 Colore aggr. GRIGIO CHIARO</p>	<p><input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)</p>

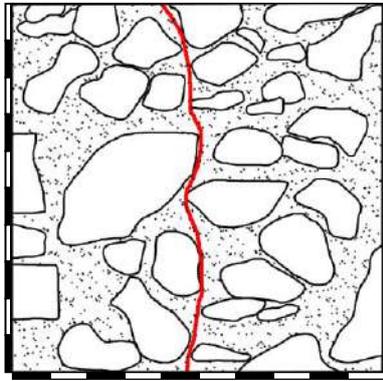
4. SEZIONE MURARIA

<p>4.1 FOTO DELLA SEZIONE MURARIA</p> 	<p>SEZIONE A-A – Foto</p> 	<p>SEZIONE A-A - Restituzione grafica</p> 
--	--	--

<p>Osservazioni</p>	<p>Valori in percentuale: pietre, malta, vuoti</p> 	<p>Istogramma con i valori di pietre, malta, vuoti</p> 
----------------------------	--	--

<p>4.1 RUOLO STRUTTUR.</p> <input checked="" type="checkbox"/> Muratura d'ambito <input type="checkbox"/> Muratura di spina <input type="checkbox"/> Pilastro <input type="checkbox"/> Tamponamento <input type="checkbox"/> Muratura interna	<p>4.2 TIPOLOGIA</p> <input checked="" type="checkbox"/> In pietra <input type="checkbox"/> In mattoni <input type="checkbox"/> In blocchi di tufo <input type="checkbox"/> In blocchi di cls <input type="checkbox"/> Mista	<p>4.3 TIPO DI SEZIONE</p> <input type="checkbox"/> Paramento unico <input type="checkbox"/> 2 paramenti accostati <input type="checkbox"/> 2 paramenti parzialmente ammorsati <input type="checkbox"/> 2 paramenti ammorsati <input checked="" type="checkbox"/> 3 paramenti	<p>4.4 SPESSORE SEZIONE</p> <input type="checkbox"/> Sp. Sezione cm 1 0 0 <input type="checkbox"/> Sp. Paramento DX cm 1 2 <input type="checkbox"/> Sp. Paramento SX cm 1 2 <input type="checkbox"/> Sp. Interno cm 7 6
--	---	--	---

<p>4.5 PRESENZA DI ZEPPE</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (P.Z. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (P.Z. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (P.Z. .R)	<p>4.6 PRESENZA DI DIATONI O LEGAMENTI</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (P.D. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (P.D. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (P.D. .R)
---	---

<p>4.7 VUOTI / ORIZZONTAMENTI</p> <p>4.7.1 DISTRIBUZIONE VUOTI</p> <input checked="" type="checkbox"/> Assenti <input type="checkbox"/> Localizzati <input type="checkbox"/> Distribuiti <p>4.7.2 DIMENSIONE VUOTI</p> <input type="checkbox"/> Piccole (<1 cm) <input type="checkbox"/> Medie (1+5 cm) <input type="checkbox"/> Grandi (<5 cm) <p>4.7.3 ORIZZONTAMENTI</p> <input checked="" type="checkbox"/> Assenti <input type="checkbox"/> Presenti ogni cm <input type="text"/> <input type="text"/>	<p>OSSERVAZIONI</p>  <p>Il valore della LMT in sezione è di 115,2 cm, che conferma l'assenza di diatoni, rendendo non rispettato il parametro della regola dell'arte ad esso corrispondente.</p>
---	--

5. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DELLA SEZIONE

<p>3.1 ELEMENTI LAPIDEI</p>			
<p>5.1.1 Tipo di Elemento</p> <input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare <input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo <input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro	<p>5.1.2 Provenienza</p> <input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale <input type="checkbox"/> Greto del fiume <input type="checkbox"/> Cava	<p>5.1.3 Lavorazione</p> <input checked="" type="checkbox"/> Assente <input type="checkbox"/> Appena sbozzata <input type="checkbox"/> Spigoli finiti faccia vista non lavor.	<p>5.1.4 Stato di conservazione</p> <input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre <input type="checkbox"/> Cattivo <input checked="" type="checkbox"/> Pessimo
<p>5.1.5 Regolarità (forma) degli elementi</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)	<p>5.1.6 Dimensioni degli elementi</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL) < 15 cm <input type="checkbox"/> Parzialm. rispettato (D.EL) 15 cm ÷ 25 cm <input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL) > 25 cm		

<p>5.2 MALTA</p>		
<p>5.2.1 Funzione</p> <input type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura <input checked="" type="checkbox"/> Riempimento <p>5.2.2 Consistenza</p> <input checked="" type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile <input type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace <p>5.2.3 Colore malta GRIGIO/ROSA</p>	<p>5.2.4 Tipo di aggregato</p> <input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto <input type="checkbox"/> Ghiaia <p>5.2.5 Forma dell'aggregato</p> <input checked="" type="checkbox"/> Arrotondata <input type="checkbox"/> Spigolosa <p>5.2.6 Colore aggr. GRIGIO CHIARO</p>	<p>5.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza</p> <input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)

La muratura, in base all'osservazione visiva dei parametri della regola dell'arte non risulta essere di buona qualità.

L'indice di qualità muraria IQM risulta infatti essere:

$$IQM_V = 2,45$$

$$IQM_{NP} = 2,1$$

$$IQM_{FP} = 2,1$$

La muratura risulta quindi rientrare in classe C per tutte tre le tipologie di azioni.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità muraria mediante la linea di minimo tracciato LMT, calcolata sul paramento, risulta essere di 113,2 cm e la muratura in questione è quindi una muratura di livello 1, M1.

ATTRIBUZIONE DI UNA DELLE TIPOLOGIE MURARIE

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		2,2	0,039	0,09	1068,9

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019, si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura a conci sbazzati con paramento di spessore disomogeneo*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati nella tabella sottostante:

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

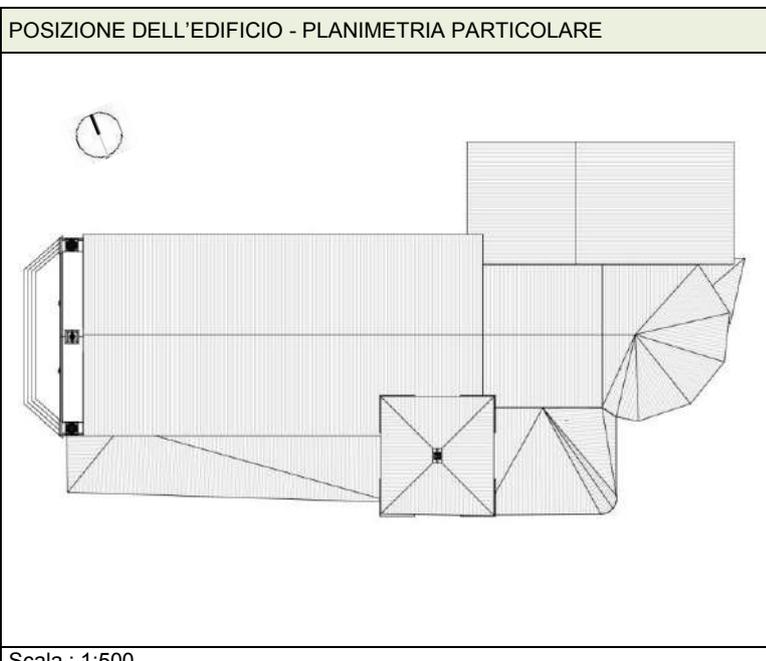
Tabella C8.5.1, valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura (Circolare 2019)

Muratura a conci sbazzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2	0,035	0	1020	340	20
	max	2	0,051	0	1440	480	20
	medio	2	0,043	0	1230	410	20

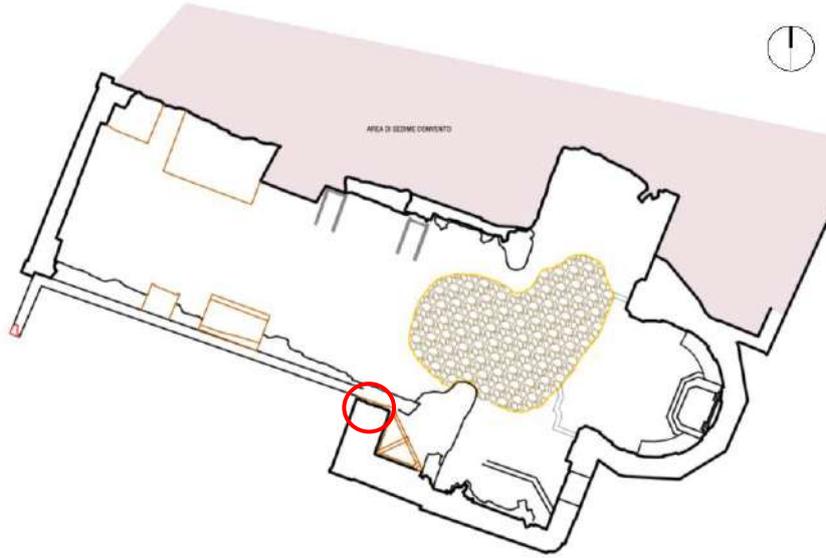
SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILIEVO DELLA TIPOLOGIA E DELLA QUALITÀ DELLA MURATURA

Parte prima

1. UBICAZIONE / IDENTIFICAZIONE		Spazio riservato						
Regione	UMBRIA	Codici ISTAT	1 0	Aggregato n°		N° Paramenti		
Provincia	PERUGIA		0 5 4	Edificio n°		N° Sezioni		
Comune	NORCIA		0 3 5	Data	/ /			
Fraz./Loc.	NORCIA			DATI CATASTALI Foglio Allegato				
Indirizzo	PIAZZA SAN BENEDETTO			Particelle				
	N° Civico			Coordinate geografiche (ED50 – UTM 32-33)				
Sezione Censuaria				E	1 3 0 5 0 6 . 2	Fuso		
				N	4 2 4 7 3 2 . 4			
Denominazione	BASILICA DI SAN BENEDETTO DI NORCIA			Epoca di costruzione	<input type="checkbox"/> <1919	<input type="checkbox"/> '19÷'45	<input type="checkbox"/> '46÷'61	<input type="checkbox"/> '61÷'71
					<input type="checkbox"/> '72÷'81	<input type="checkbox"/> '82÷'91	<input type="checkbox"/> '92÷'01	<input checked="" type="checkbox"/> <1300



POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELLA PIANTA DELL'EDIFICIO



POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELL'EDIFICIO

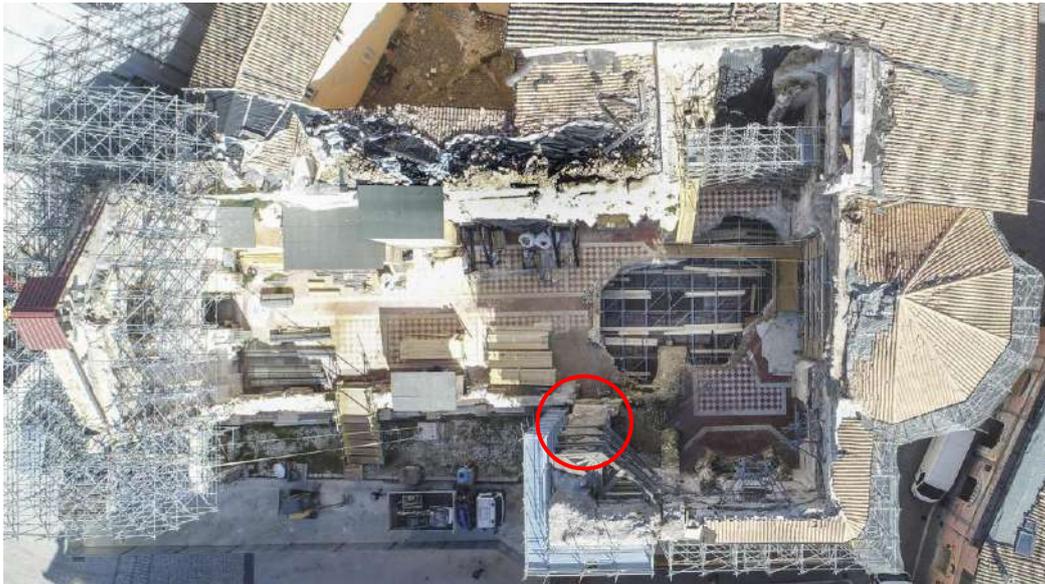


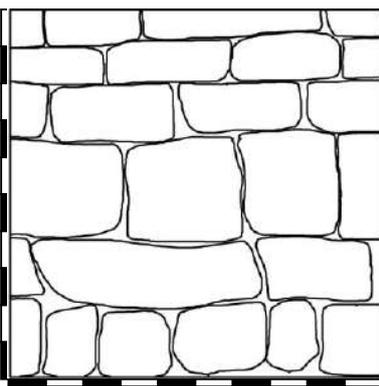
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1



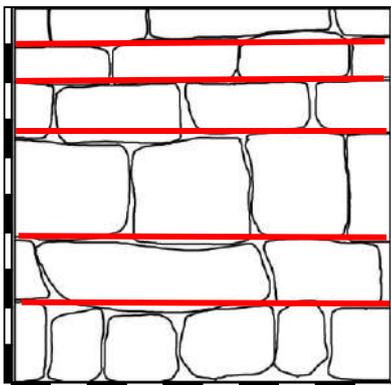
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1



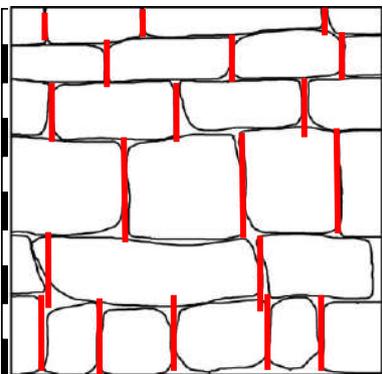
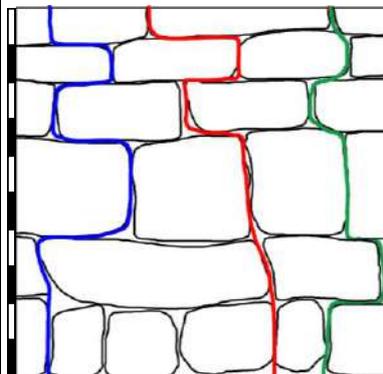
2. TESSITURA DEL PARAMENTO **Parte seconda**

		<p>Foto e disegni scala 1:20</p> <p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pietre Vuoti Mattoni Intonaco Malta Vegetazione
---	--	---

2.1 RUOLO STRUTTURALE	2.2 TIPOLOGIA	2.6 APPARECCHIATURA / ORIZZONTALITÀ DEI FILARI
------------------------------	----------------------	---

<input checked="" type="checkbox"/> Muratura d'ambito <input type="checkbox"/> Muratura di spina <input type="checkbox"/> Pilastro <input type="checkbox"/> Tamponamento <input type="checkbox"/> Muratura interna	<input checked="" type="checkbox"/> Pietra <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/> Mattoni <input type="checkbox"/> Blocchi di tufo <input type="checkbox"/> Blocchi di cls <input type="checkbox"/> Mista	<input type="checkbox"/> Irregolare (Orizzontamenti NR) <input type="checkbox"/> A corsi sub-orizzontali (Orizzontamenti PR) <input checked="" type="checkbox"/> A corsi orizzontali (Orizzontamenti R)
2.3 RICORSI Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> In elementi più grandi <input type="checkbox"/> In mattoni <input type="checkbox"/> In cls	2.4 ORIZZONT./ LISTATURE Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 2.5 ZEPPE Assenti <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> In pietra <input type="checkbox"/> In cotto	

2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI	OSSERVAZIONI
---	---------------------

<input type="checkbox"/> Non rispettato (S.G. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (S.G. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (S.G. R)	  <p>Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 153,6 cm. È presente, quindi, un medio ingranamento nel piano delle pareti.</p>
--	--

3. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DEL PARAMENTO

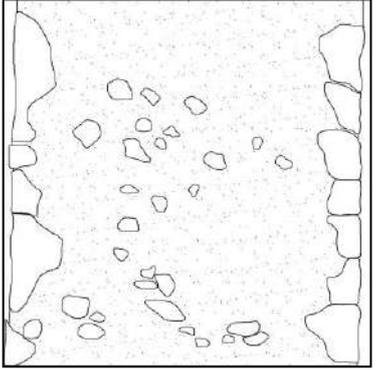
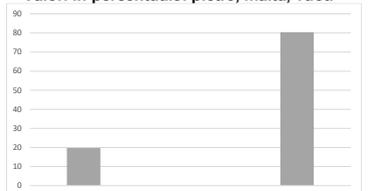
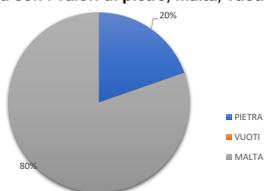
3.1 ELEMENTI LAPIDEI

3.1.1 Tipo di Elemento <input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare <input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo <input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro _____	3.1.2 Provenienza <input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale <input type="checkbox"/> Greto del fiume <input type="checkbox"/> Cava	3.1.3 Lavorazione <input type="checkbox"/> Assente <input type="checkbox"/> Appena sbazzata <input checked="" type="checkbox"/> Spigoli finiti e faccia vista non lavorata	3.1.4 Stato di conservazione <input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre <input checked="" type="checkbox"/> Cattivo <input type="checkbox"/> Pessimo
3.1.5 Regolarità (forma) degli elementi <input type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)	3.1.6 Dimensioni degli elementi <input type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL.) < 15 cm <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (D.EL.) 15 cm + 25 cm <input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL.) > 25 cm		

3.2 MALTA	3.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza
------------------	--

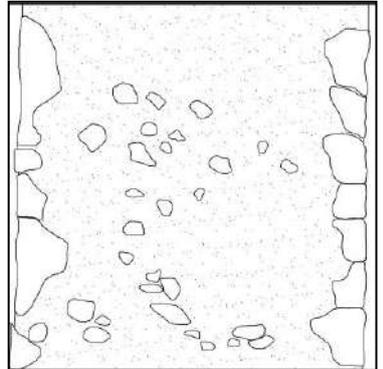
3.2.1 Funzione <input checked="" type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura <input type="checkbox"/> Rimpimento	3.2.5 Tipo di aggregato <input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto <input type="checkbox"/> Ghiaia	<input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR) <input checked="" type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)
3.2.2 Consistenza <input type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile <input checked="" type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace	3.2.6 Forma dell'aggregato <input type="checkbox"/> Arrotondata <input checked="" type="checkbox"/> Spigolosa	
3.2.3 Colore malta GRIGIO/ROSA	3.2.4 Colore aggr. GRIGIO/ROSA	

4. SEZIONE MURARIA

<p>4.1 FOTO DELLA SEZIONE MURARIA</p> 	<p>SEZIONE A-A – Foto</p> 	<p>SEZIONE A-A - Restituzione grafica</p> 																
<p>Osservazioni</p> <p>La muratura in oggetto non corrisponde a 1x1x1 m in quanto raggiunge uno spessore di 2,36 m.</p> <p>La rappresentazione non è in scala.</p>	<p>Valori in percentuale: pietre, malta, vuoti</p>  <table border="1"> <caption>Valori in percentuale: pietre, malta, vuoti</caption> <thead> <tr> <th>Categoria</th> <th>Valore (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PIETRA</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>VUOTI</td> <td>~12</td> </tr> <tr> <td>MALTA</td> <td>~70</td> </tr> </tbody> </table>	Categoria	Valore (%)	PIETRA	~18	VUOTI	~12	MALTA	~70	<p>Istogramma con i valori di pietre, malta, vuoti</p>  <table border="1"> <caption>Istogramma con i valori di pietre, malta, vuoti</caption> <thead> <tr> <th>Categoria</th> <th>Valore (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PIETRA</td> <td>~18</td> </tr> <tr> <td>VUOTI</td> <td>~12</td> </tr> <tr> <td>MALTA</td> <td>~70</td> </tr> </tbody> </table>	Categoria	Valore (%)	PIETRA	~18	VUOTI	~12	MALTA	~70
Categoria	Valore (%)																	
PIETRA	~18																	
VUOTI	~12																	
MALTA	~70																	
Categoria	Valore (%)																	
PIETRA	~18																	
VUOTI	~12																	
MALTA	~70																	

<p>4.1 RUOLO STRUTTUR.</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Muratura d'ambito</p> <p><input type="checkbox"/> Muratura di spina</p> <p><input type="checkbox"/> Pilastro</p> <p><input type="checkbox"/> Tamponamento</p> <p><input type="checkbox"/> Muratura interna</p>	<p>4.2 TIPOLOGIA</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> In pietra</p> <p><input type="checkbox"/> In mattoni</p> <p><input type="checkbox"/> In blocchi di tufo</p> <p><input type="checkbox"/> In blocchi di cls</p> <p><input type="checkbox"/> Mista</p>	<p>4.3 TIPO DI SEZIONE</p> <p><input type="checkbox"/> Paramento unico</p> <p><input type="checkbox"/> 2 paramenti accostati</p> <p><input type="checkbox"/> 2 paramenti parzialmente ammorsati</p> <p><input type="checkbox"/> 2 paramenti ammorsati</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 3 paramenti</p>	<p>4.4 SPESSORE SEZIONE</p> <p><input type="checkbox"/> Sp. Sezione cm 2 3 6 </p> <p><input type="checkbox"/> Sp. Paramento DX cm 1 2 </p> <p><input type="checkbox"/> Sp. Paramento SX cm 1 2 </p> <p><input type="checkbox"/> Sp. Interno cm 2 1 2 </p>
---	--	---	--

<p>4.5 PRESENZA DI ZEPPE</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (P.Z. NR)</p> <p><input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (P.Z. PR)</p> <p><input type="checkbox"/> Rispettato (P.Z. .R)</p>	<p>4.6 PRESENZA DI DIATONI O LEGAMENTI</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (P.D. NR)</p> <p><input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (P.D. PR)</p> <p><input type="checkbox"/> Rispettato (P.D. .R)</p>
--	--

<p>4.7 VUOTI / ORIZZONTAMENTI</p> <p>4.7.1 DISTRIBUZIONE VUOTI</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Assenti <input type="checkbox"/> Localizzati</p> <p><input type="checkbox"/> Distribuiti</p> <p>4.7.2 DIMENSIONE VUOTI</p> <p><input type="checkbox"/> Piccole (<1 cm)</p> <p><input type="checkbox"/> Medie (1+5 cm)</p> <p><input type="checkbox"/> Grandi (<5 cm)</p> <p>4.7.3 ORIZZONTAMENTI</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Assenti</p> <p><input type="checkbox"/> Presenti ogni cm <input type="text"/> <input type="text"/></p>	<p>OSSERVAZIONI</p>  <p>Il valore della LMT in sezione non è stato valutato, un quanto in sezione si vede una presenza preponderante di malta e scarsi elementi lapidei, rendendo a vista d'occhio non rispettato il parametro che fa riferimento alla presenza di diatoni in sezione.</p>
--	--

5. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DELLA SEZIONE

<p>3.1 ELEMENTI LAPIDEI</p>			
<p>5.1.1 Tipo di Elemento</p> <p><input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare</p> <p><input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo</p> <p><input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro</p>	<p>5.1.2 Provenienza</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale</p> <p><input type="checkbox"/> Greto del fiume</p> <p><input type="checkbox"/> Cava</p>	<p>5.1.3 Lavorazione</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Assente</p> <p><input type="checkbox"/> Appena sbozzata</p> <p><input type="checkbox"/> Spigoli finiti faccia vista non lavor.</p>	<p>5.1.4 Stato di conservazione</p> <p><input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre</p> <p><input type="checkbox"/> Cattivo <input checked="" type="checkbox"/> Pessimo</p>
<p>5.1.5 Regolarità (forma) degli elementi</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR)</p> <p><input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR)</p> <p><input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)</p>	<p>5.1.6 Dimensioni degli elementi</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL) < 15 cm</p> <p><input type="checkbox"/> Parzialm. rispettato (D.EL) 15 cm ÷ 25 cm</p> <p><input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL) > 25 cm</p>		

<p>5.2 MALTA</p>		
<p>5.2.1 Funzione</p> <p><input type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Riempimento</p> <p>5.2.2 Consistenza</p> <p><input type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace</p> <p>5.2.3 Colore malta GRIGIO/ROSA</p>	<p>5.2.4 Tipo di aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto</p> <p><input type="checkbox"/> Ghiaia</p> <p>5.2.5 Forma dell'aggregato</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Arrotondata</p> <p><input type="checkbox"/> Spigolosa</p> <p>5.2.6 Colore aggr. GRIGIO/ROSA</p>	<p>5.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR)</p> <p><input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR)</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)</p>

La muratura, in base all'osservazione visiva dei parametri della regola dell'arte non risulta essere di buona qualità.

L'indice di qualità muraria IQM risulta infatti essere:

$$IQM_V = 4,55$$

$$IQM_{NP} = 3,5$$

$$IQM_{FP} = 3,85$$

La muratura risulta quindi rientrare in classe B per azioni verticali e azioni fuori piano, in classe C per azioni nel piano della muratura.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità muraria mediante la linea di minimo tracciato LMT, calcolata sul paramento, risulta essere di 153,66 cm e la muratura in questione è quindi una muratura di livello 4, M4.

ATTRIBUZIONE DI UNA DELLE TIPOLOGIE MURARIE

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		3,3	0,059	0,15	1479,5

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019, si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura a conci sbazzati con paramento di spessore disomogeneo*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati nella tabella sottostante:

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

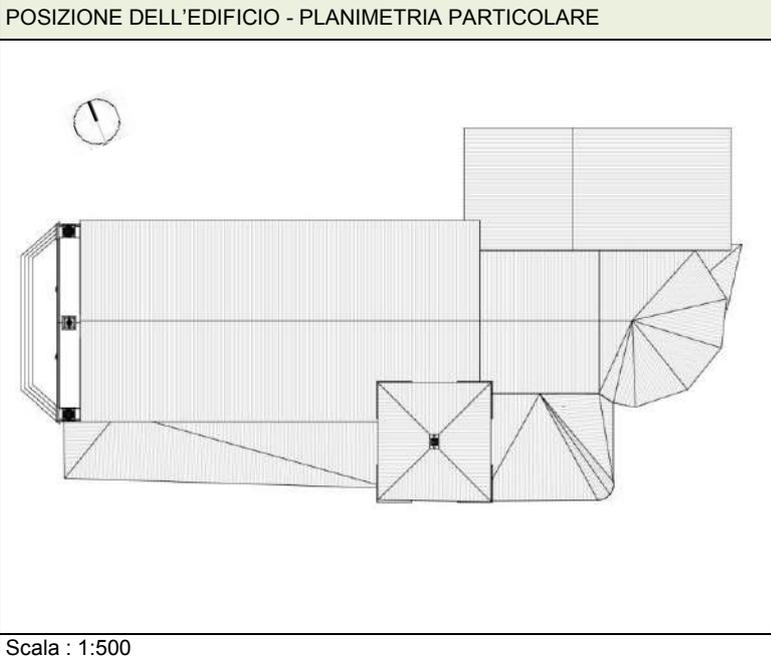
Tabella C8.5.1, valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura (Circolare 2019)

Muratura a conci sbazzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2	0,035	0	1020	340	20
	max	2	0,051	0	1440	480	20
	medio	2	0,043	0	1230	410	20

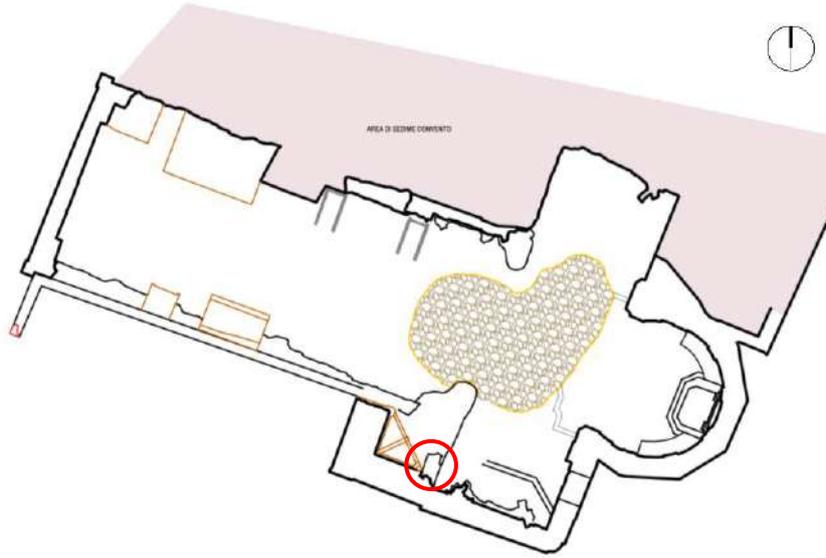
SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILIEVO DELLA TIPOLOGIA E DELLA QUALITÀ DELLA MURATURA

Parte prima

1. UBICAZIONE / IDENTIFICAZIONE		Spazio riservato			
Regione	UMBRIA	Codici ISTAT	1 0	Aggregato n°	
Provincia	PERUGIA		0 5 4	Edificio n°	
Comune	NORCIA		0 3 5	Data	/ /
Fraz./Loc.	NORCIA			N° Paramenti	
Indirizzo	PIAZZA SAN BENEDETTO			N° Sezioni	
	N° Civico			DATI CATASTALI Foglio Allegato	
Sezione Censuaria				Particelle	
Coordinate geografiche (ED50 – UTM 32-33)					
	E	1 3 0 5 0 6 . 2		Fuso	
	N	4 2 4 7 3 2 . 4			
Denominazione	BASILICA DI SAN BENEDETTO DI NORCIA			Epoca di costruzione	<input type="checkbox"/> <1919 <input type="checkbox"/> '19÷'45 <input type="checkbox"/> '46÷'61 <input type="checkbox"/> '61÷'71 <input type="checkbox"/> '72÷'81 <input type="checkbox"/> '82÷'91 <input type="checkbox"/> '92÷'01 <input checked="" type="checkbox"/> <1300



POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELLA PIANTA DELL'EDIFICIO



PIANTA STATO DI FATTO – scala 1:500

POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELL'EDIFICIO

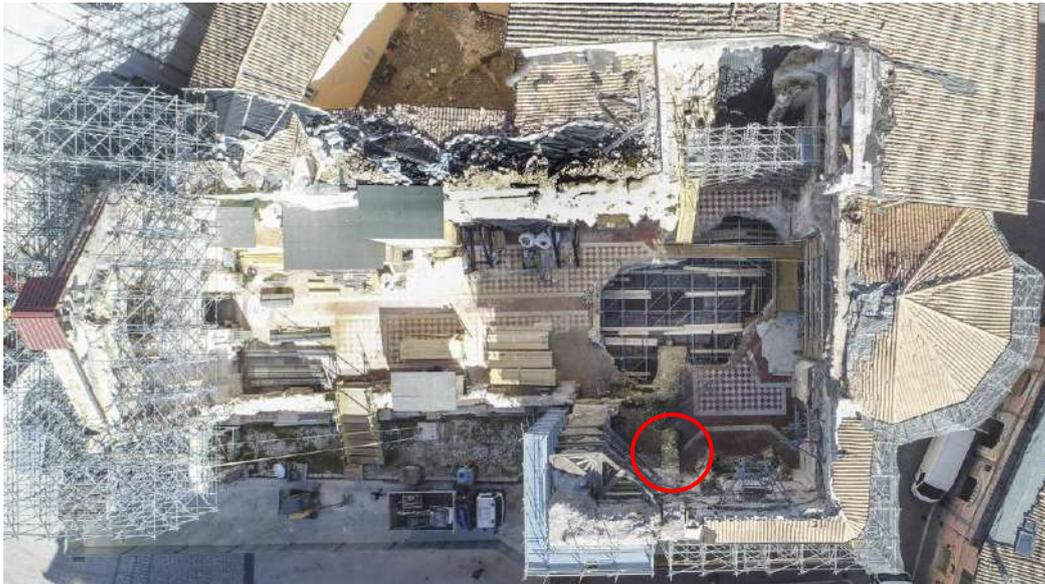


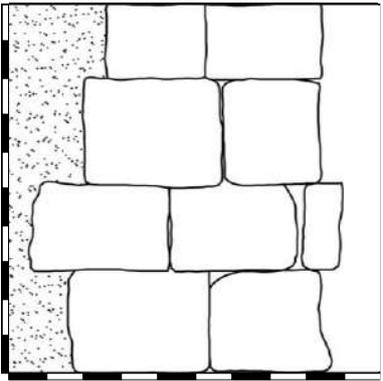
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1

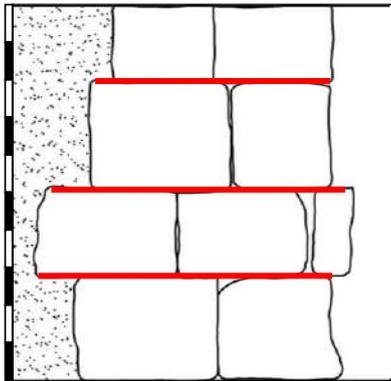


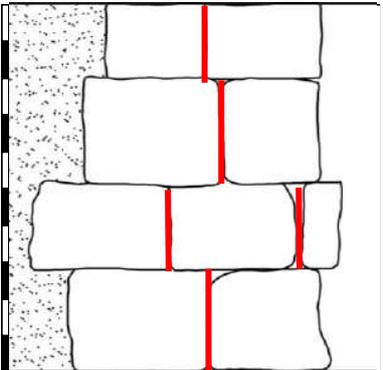
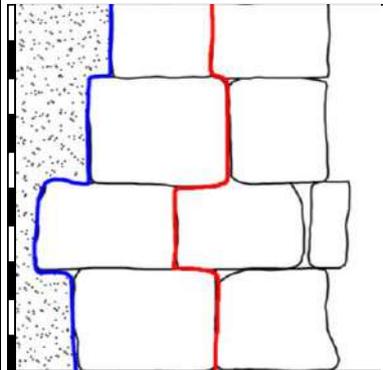
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1



2. TESSITURA DEL PARAMENTO **Parte seconda**

		<p>Foto e disegni scala 1:20</p> <p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pietre Vuoti Mattoni Intonaco Malta Vegetazione
---	--	---

<p>2.1 RUOLO STRUTTURALE</p> <p><input type="checkbox"/> Muratura d'ambito <input type="checkbox"/> Muratura di spina <input type="checkbox"/> Pilastro <input type="checkbox"/> Tamponamento <input checked="" type="checkbox"/> Muratura interna</p>	<p>2.2 TIPOLOGIA</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Pietra <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/> Mattoni <input type="checkbox"/> Blocchi di tufo <input type="checkbox"/> Blocchi di cls <input type="checkbox"/> Mista</p>	<p>2.6 APPARECCHIATURA / ORIZZONTALITÀ DEI FILARI</p> <p><input type="checkbox"/> Irregolare (Orizzontamenti NR) <input type="checkbox"/> A corsi sub-orizzontali (Orizzontamenti PR) <input checked="" type="checkbox"/> A corsi orizzontali (Orizzontamenti R)</p> <div style="text-align: right;">  </div>
<p>2.3 RICORSI</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/> In elementi più grandi <input type="checkbox"/> In mattoni <input type="checkbox"/> In cls</p>	<p>2.4 ORIZZONT./ LISTATURE</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	<p>2.5 ZEPPE</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> In pietra <input type="checkbox"/> In cotto</p>

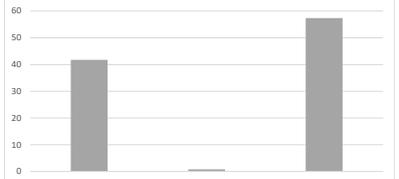
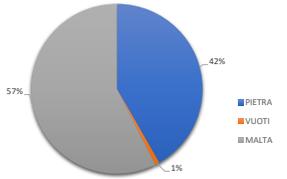
<p>2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (S.G. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (S.G. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (S.G. R)</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>OSSERVAZIONI</p> <p>Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 130 cm. Non è presente, quindi, un elevato ingranamento nel piano delle pareti.</p> <div style="text-align: center;">  </div>
--	--

3. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DEL PARAMENTO

3.1 ELEMENTI LAPIDEI			
<p>3.1.1 Tipo di Elemento</p> <p><input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare <input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo <input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro _____</p>	<p>3.1.2 Provenienza</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale <input type="checkbox"/> Greto del fiume <input type="checkbox"/> Cava</p>	<p>3.1.3 Lavorazione</p> <p><input type="checkbox"/> Assente <input type="checkbox"/> Appena sbazzata <input checked="" type="checkbox"/> Spigoli finiti e faccia vista non lavorata</p>	<p>3.1.4 Stato di conservazione</p> <p><input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre <input checked="" type="checkbox"/> Cattivo <input type="checkbox"/> Pessimo</p>
<p>3.1.5 Regolarità (forma) degli elementi</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)</p>	<p>3.1.6 Dimensioni degli elementi</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL.) < 15 cm <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (D.EL.) 15 cm + 25 cm <input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL.) > 25 cm</p>		

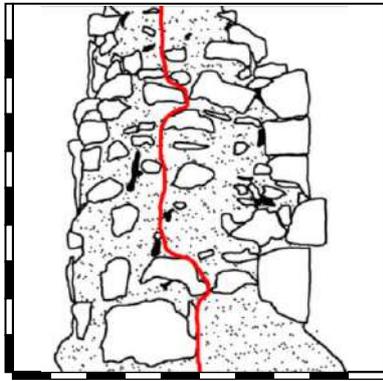
3.2 MALTA		3.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza
<p>3.2.1 Funzione</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura <input type="checkbox"/> Riempimento</p>	<p>3.2.5 Tipo di aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto <input type="checkbox"/> Ghiaia</p>	<p><input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)</p>
<p>3.2.2 Consistenza</p> <p><input type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile <input checked="" type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace</p>	<p>3.2.6 Forma dell'aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Arrotondata <input checked="" type="checkbox"/> Spigolosa</p>	
<p>3.2.3 Colore malta MARRONE/ROSSO</p>		<p>3.2.4 Colore aggr. MARRONE/ROSSO</p>

4. SEZIONE MURARIA

<p>4.1 FOTO DELLA SEZIONE MURARIA</p> 	<p>SEZIONE A-A – Foto</p> 	<p>SEZIONE A-A - Restituzione grafica</p> 
<p>Osservazioni</p>	<p>Valori in percentuale: pietre, malta, vuoti</p> 	<p>Istogramma con i valori di pietre, malta, vuoti</p> 

<p>4.1 RUOLO STRUTTUR.</p> <input type="checkbox"/> Muratura d'ambito <input type="checkbox"/> Muratura di spina <input type="checkbox"/> Pilastro <input type="checkbox"/> Tamponamento <input checked="" type="checkbox"/> Muratura interna	<p>4.2 TIPOLOGIA</p> <input checked="" type="checkbox"/> In pietra <input type="checkbox"/> In mattoni <input type="checkbox"/> In blocchi di tufo <input type="checkbox"/> In blocchi di cls <input type="checkbox"/> Mista	<p>4.3 TIPO DI SEZIONE</p> <input type="checkbox"/> Paramento unico <input type="checkbox"/> 2 paramenti accostati <input type="checkbox"/> 2 paramenti parzialmente ammorsati <input type="checkbox"/> 2 paramenti ammorsati <input checked="" type="checkbox"/> 3 paramenti	<p>4.4 SPESSORE SEZIONE</p> <input type="checkbox"/> Sp. Sezione cm <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Sp. Paramento DX cm <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Sp. Paramento SX cm <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="checkbox"/> Sp. Interno cm <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
--	---	--	--

<p>4.5 PRESENZA DI ZEPPE</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (P.Z. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (P.Z. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (P.Z. .R)	<p>4.6 PRESENZA DI DIATONI O LEGAMENTI</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (P.D. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (P.D. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (P.D. .R)
---	---

<p>4.7 VUOTI / ORIZZONTAMENTI</p> <p>4.7.1 DISTRIBUZIONE VUOTI</p> <input type="checkbox"/> Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Localizzati <input type="checkbox"/> Distribuiti <p>4.7.2 DIMENSIONE VUOTI</p> <input checked="" type="checkbox"/> Piccole (<1 cm) <input type="checkbox"/> Medie (1÷5 cm) <input type="checkbox"/> Grandi (<5 cm) <p>4.7.3 ORIZZONTAMENTI</p> <input checked="" type="checkbox"/> Assenti <input type="checkbox"/> Presenti ogni cm <input type="text"/> <input type="text"/>	<p>OSSERVAZIONI</p>  <p>Il valore della LMT in sezione è di 122 cm, che conferma l'assenza di diatoni, rendendo non rispettato il parametro della regola dell'arte ad esso corrispondente.</p>
--	--

5. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DELLA SEZIONE

<p>3.1 ELEMENTI LAPIDEI</p>			
<p>5.1.1 Tipo di Elemento</p> <input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare <input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo <input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro	<p>5.1.2 Provenienza</p> <input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale <input type="checkbox"/> Greto del fiume <input type="checkbox"/> Cava	<p>5.1.3 Lavorazione</p> <input checked="" type="checkbox"/> Assente <input type="checkbox"/> Appena sbozzata <input type="checkbox"/> Spigoli finiti faccia vista non lavor.	<p>5.1.4 Stato di conservazione</p> <input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre <input type="checkbox"/> Cattivo <input checked="" type="checkbox"/> Pessimo
<p>5.1.5 Regolarità (forma) degli elementi</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR) <input type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)	<p>5.1.6 Dimensioni degli elementi</p> <input checked="" type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL) < 15 cm <input type="checkbox"/> Parzialm. rispettato (D.EL) 15 cm ÷ 25 cm <input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL) > 25 cm		

<p>5.2 MALTA</p>		
<p>5.2.1 Funzione</p> <input type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura <input checked="" type="checkbox"/> Riempimento <p>5.2.2 Consistenza</p> <input checked="" type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile <input type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace <p>5.2.3 Colore malta MARRONE/ROSSO</p>	<p>5.2.4 Tipo di aggregato</p> <input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto <input type="checkbox"/> Ghiaia <p>5.2.5 Forma dell'aggregato</p> <input checked="" type="checkbox"/> Arrotondata <input type="checkbox"/> Spigolosa <p>5.2.6 Colore aggr. MARRONE/ROSSO</p>	<p>5.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza</p> <input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)

La muratura, in base all'osservazione visiva dei parametri della regola dell'arte non risulta essere di buona qualità.

L'indice di qualità muraria IQM risulta infatti essere:

$$IQM_V = 3,5$$

$$IQM_{NP} = 3,15$$

$$IQM_{FP} = 3,15$$

La muratura risulta quindi rientrare in classe B per azioni verticali e azioni fuori piano, in classe C per azioni nel piano della muratura.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità muraria mediante la linea di minimo tracciato LMT, calcolata sul paramento, risulta essere di 130 cm e la muratura in questione è quindi una muratura di livello 2, M2.

ATTRIBUZIONE DI UNA DELLE TIPOLOGIE MURARIE

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		2,7	0,051	0,13	1257,5

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019, si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura a conci sbazzati con paramenti di spessore disomogeneo*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati nella tabella sottostante:

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Tabella C8.5.1, valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura (Circolare 2019)

Muratura a conci sbazzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2	0,035	0	1020	340	20
	max	2	0,051	0	1440	480	20
	medio	2	0,043	0	1230	410	20

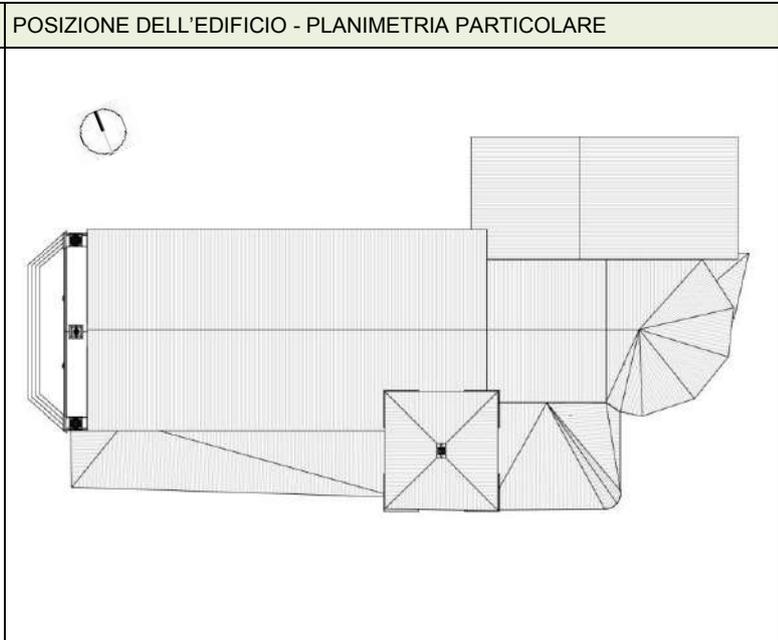
SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILIEVO DELLA TIPOLOGIA E DELLA QUALITÀ DELLA MURATURA

Parte prima

1. UBICAZIONE / IDENTIFICAZIONE		Spazio riservato					
		<i>Codici ISTAT</i>					
Regione	UMBRIA	1 0	Aggregato n°		N° Paramenti		
Provincia	PERUGIA	0 5 4	Edificio n°		N° Sezioni		
Comune	NORCIA	0 3 5	Data	/ /			
Fraz./Loc.	NORCIA		DATI CATASTALI Foglio Allegato				
Indirizzo	PIAZZA SAN BENEDETTO		Particelle				
	N° Civico		Coordinate geografiche (ED50 – UTM 32-33)				
Sezione Censuaria			E	1 3 0 5 0 6 . 2	Fuso		
Denominazione	BASILICA DI SAN BENEDETTO DI NORCIA		N	4 2 4 7 3 2 . 4			
			Epoca di costruzione	<input type="checkbox"/> <1919	<input type="checkbox"/> '19÷'45	<input type="checkbox"/> '46÷'61	<input type="checkbox"/> '61÷'71
				<input type="checkbox"/> '72÷'81	<input type="checkbox"/> '82÷'91	<input type="checkbox"/> '92÷'01	<input checked="" type="checkbox"/> <1300



Scala : 1: 1000



Scala : 1:500

FOTO EDIFICIO



[FOTO PRE SISMA 2016]

FOTO EDIFICIO



[FOTO POST SISMA 2016]

2. TESSITURA DEL PARAMENTO

Parte seconda

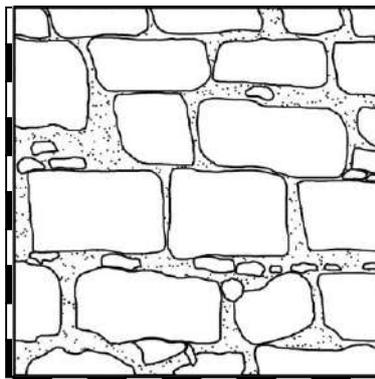
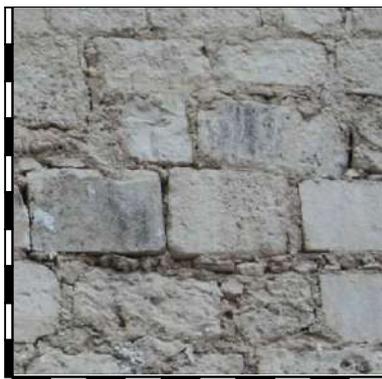


Foto e disegni scala 1:20

Legenda:

-  Pietre
-  Vuoti
-  Mattoni
-  Intonaco
-  Malta
-  Vegetazione

2.1 RUOLO STRUTTURALE

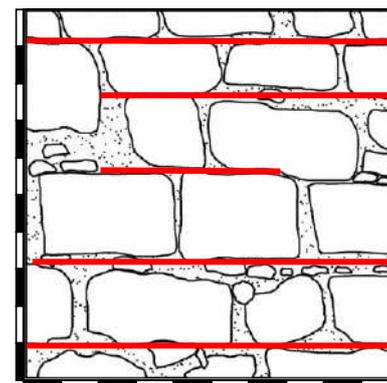
- Muratura d'ambito
- Muratura di spina
- Pilastro
- Tamponamento
- Muratura interna

2.2 TIPOLOGIA

- Pietra Altro
- Mattoni
- Blocchi di tufo
- Blocchi di cls
- Mista

2.6 APPARECCHIATURA / ORIZZONTALITÀ DEI FILARI

- Irregolare (Orizzontamenti **NR**)
- A corsi sub-orizzontali (Orizzontamenti **PR**)
- A corsi orizzontali (Orizzontamenti **R**)



2.3 RICORSI

- Assenti
- Presenti ogni m.
- In elementi più grandi
- In mattoni
- In cls

2.4 ORIZZONT./ LISTATURE

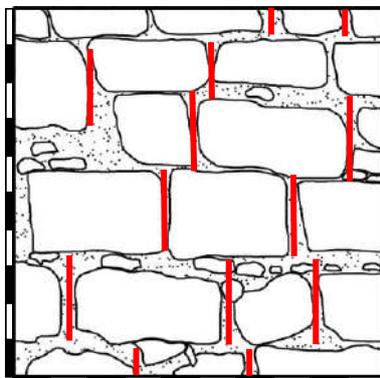
- Assenti
- Presenti ogni m.

2.5 ZEPPE

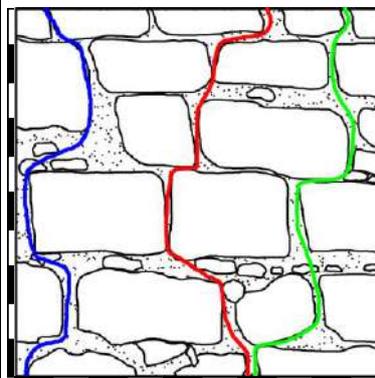
- Assenti In pietra In cotto

2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI

- Non rispettato (S.G. **NR**)
- Parzialmente rispettato (S.G. **PR**)
- Rispettato (S.G. **R**)



OSSERVAZIONI



Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 135,3 cm. Non è presente, quindi, un elevato ingranamento nel piano delle pareti.

3. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DEL PARAMENTO

3.1 ELEMENTI LAPIDEI

3.1.1 Tipo di Elemento

- Arenaria Calcare
- Travertino Tufo
- Mattoni cotti Mattoni crudi
- Altro _____

3.1.2 Provenienza

- Scavo locale
- Greto del fiume
- Cava

3.1.3 Lavorazione

- Assente
- Appena sbazzata
- Spigoli finiti e faccia vista non lavorata

3.1.4 Stato di conservazione

- Buono
- Mediocre
- Cattivo
- Pessimo

3.1.5 Regolarità (forma) degli elementi

- Non rispettato (R.EL. **NR**)
- Parzialmente rispettato (R.EL. **PR**)
- Rispettato (R.EL. **R**)

3.1.6 Dimensioni degli elementi

- Non rispettato (D.EL.) < 15 cm
- Parzialmente rispettato (D.EL.) 15 cm + 25 cm
- Rispettato (D.EL.) > 25 cm

3.2 MALTA

3.2.1 Funzione

- Allettamento Stilatura
- Rimpimento

3.2.2 Consistenza

- Incoerente Friabile
- Compatta Tenace

3.2.3 Colore malta GRIGIO/ROSA

3.2.5 Tipo di aggregato

- Sabbia Ghiaietto
- Ghiaia

3.2.6 Forma dell'aggregato

- Arrotondata
- Spigolosa

3.2.4 Colore aggr. GRIGIO/ROSA

3.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza

- Non rispettato (MA. **NR**)
- Parzialmente rispettato (MA. **PR**)
- Rispettato (MA. **R**)

La muratura, in base all'osservazione visiva dei parametri della regola dell'arte non risulta essere di buona qualità.

L'indice di qualità muraria IQM risulta infatti essere:

$$IQM_V = 2,45$$

$$IQM_{NP} = 2,1$$

$$IQM_{FP} = 2,1$$

La muratura risulta quindi rientrare in classe C per tutte tre le tipologie di azioni prese in considerazione.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità muraria mediante la linea di minimo tracciato LMT, calcolata sul paramento, risulta essere di 135,3 cm e la muratura in questione è quindi una muratura di livello 3, M3.

ATTRIBUZIONE DI UNA DELLE TIPOLOGIE MURARIE

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		2,2	0,039	0,09	1068,9

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019, si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura a conci sbazzati con paramento di spessore disomogeneo*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati nella tabella sottostante:

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

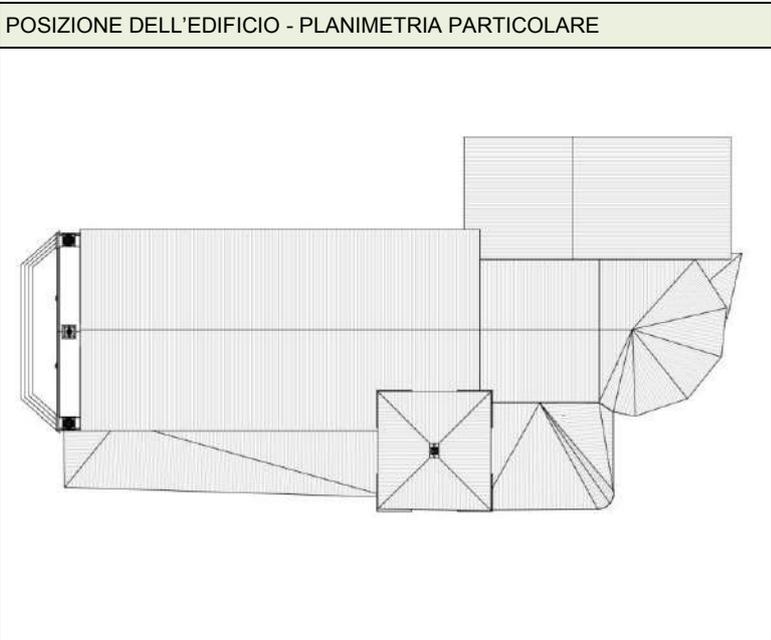
Tabella C8.5.1, valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura (Circolare 2019)

Muratura a conci sbazzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2	0,035	0	1020	340	20
	max	2	0,051	0	1440	480	20
	medio	2	0,043	0	1230	410	20

SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILIEVO DELLA TIPOLOGIA E DELLA QUALITÀ DELLA MURATURA

Parte prima

1. UBICAZIONE / IDENTIFICAZIONE		Spazio riservato						
Regione	UMBRIA	Codici ISTAT	1 0	Aggregato n°		N° Paramenti		
Provincia	PERUGIA		0 5 4	Edificio n°		N° Sezioni		
Comune	NORCIA		0 3 5	Data	/ /			
Fraz./Loc.	NORCIA			DATI CATASTALI Foglio 1 2 0 Allegato				
Indirizzo	PIAZZA SAN BENEDETTO			Particella E				
	N° Civico			Coordinate geografiche (ED50 – UTM 32-33)				
Sezione Censuaria				E	1 3 0 5 0 6 . 2	Fuso		
				N	4 2 4 7 3 2 . 4			
Denominazione	BASILICA DI SAN BENEDETTO DI NORCIA			Epoca di costruzione	<input type="checkbox"/> <1919	<input type="checkbox"/> '19÷'45	<input type="checkbox"/> '46÷'61	<input type="checkbox"/> '61÷'71
					<input type="checkbox"/> '72÷'81	<input type="checkbox"/> '82÷'91	<input type="checkbox"/> '92÷'01	<input checked="" type="checkbox"/> <1300



2. TESSITURA DEL PARAMENTO

Parte seconda

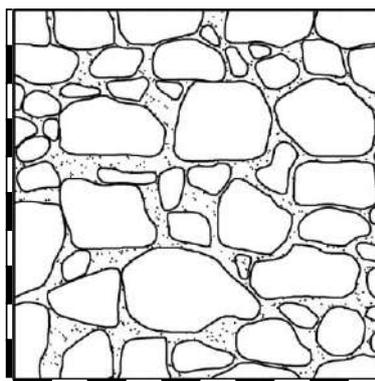
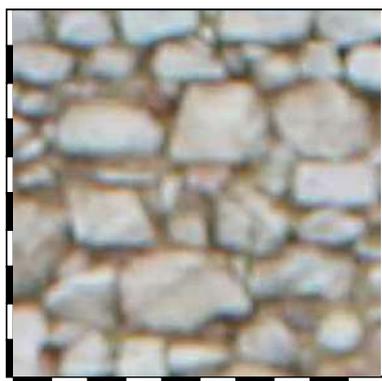


Foto e disegni scala 1:20

Legenda:

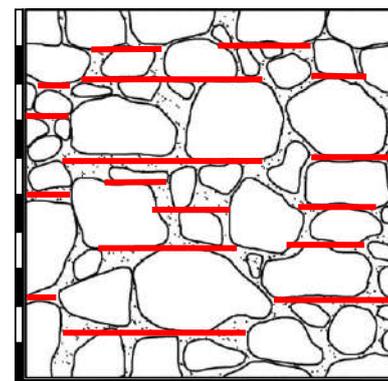
-  Pietre
-  Vuoti
-  Mattoni
-  Intonaco
-  Malta
-  Vegetazione

2.1 RUOLO STRUTTURALE **2.2 TIPOLOGIA** **2.6 APPARECCHIATURA / ORIZZONTALITÀ DEI FILARI**

- Muratura d'ambito
- Muratura di spina
- Pilastro
- Tamponamento
- Muratura interna

- Pietra Altro
- Mattoni
- Blocchi di tufo
- Blocchi di cls
- Mista

- Irregolare (Orizzontamenti **NR**)
- A corsi sub-orizzontali (Orizzontamenti **PR**)
- A corsi orizzontali (Orizzontamenti **R**)



2.3 RICORSI

- Assenti
- Presenti ogni m.
- In elementi più grandi
- In mattoni
- In cls

2.4 ORIZZONT./ LISTATURE

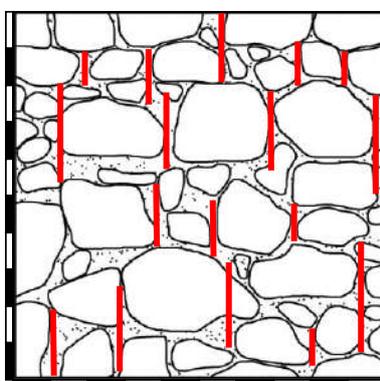
- Assenti
- Presenti ogni m.

2.5 ZEPPE

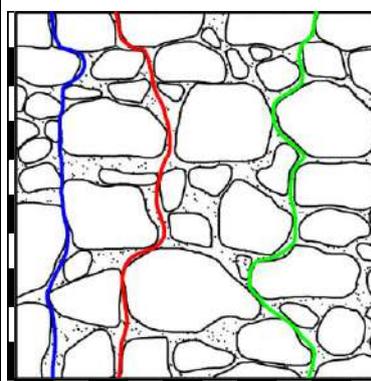
- Assenti In pietra In cotto

2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI

- Non rispettato (S.G. **NR**)
- Parzialmente rispettato (S.G. **PR**)
- Rispettato (S.G. **R**)



OSSERVAZIONI



Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 116 cm. Non è presente, quindi, un elevato ingranamento nel piano delle pareti.

3. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DEL PARAMENTO

3.1 ELEMENTI LAPIDEI

3.1.1 Tipo di Elemento

- Arenaria Calcare
- Travertino Tufo
- Mattoni cotti Mattoni crudi
- Altro _____

3.1.2 Provenienza

- Scavo locale
- Greto del fiume
- Cava

3.1.3 Lavorazione

- Assente
- Appena sbazzata
- Spigoli finiti e faccia vista non lavorata

3.1.4 Stato di conservazione

- Buono
- Mediocre
- Cattivo
- Pessimo

3.1.5 Regolarità (forma) degli elementi

- Non rispettato (R.EL. **NR**)
- Parzialmente rispettato (R.EL. **PR**)
- Rispettato (R.EL. **R**)

3.1.6 Dimensioni degli elementi

- Non rispettato (D.EL.) < 15 cm
- Parzialmente rispettato (D.EL.) 15 cm + 25 cm
- Rispettato (D.EL.) > 25 cm

3.2 MALTA

3.2.1 Funzione

- Allettamento Stilatura
- Rimpimento

3.2.2 Consistenza

- Incoerente Friabile
- Compatta Tenace

3.2.3 Colore malta GRIGIO/ROSA

3.2.5 Tipo di aggregato

- Sabbia Ghiaietto
- Ghiaia

3.2.6 Forma dell'aggregato

- Arrotondata
- Spigolosa

3.2.4 Colore aggr. GRIGIO/ROSA

3.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza

- Non rispettato (MA. **NR**)
- Parzialmente rispettato (MA. **PR**)
- Rispettato (MA. **R**)

La muratura, in base all'osservazione visiva dei parametri della regola dell'arte non risulta essere di buona qualità.

L'indice di qualità muraria IQM risulta infatti essere:

$$IQM_V = 0,35$$

$$IQM_{NP} = 0,35$$

$$IQM_{FP} = 0,7$$

La muratura risulta quindi rientrare in classe C per tutte tre le tipologie di azioni prese in considerazione.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità muraria mediante la linea di minimo tracciato LMT, calcolata sul paramento, risulta essere di 116 cm e la muratura in questione è quindi una muratura di livello 2, M2.

ATTRIBUZIONE DI UNA DELLE TIPOLOGIE MURARIE

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	fv_0 (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		1,5	0,025	0,04	866,3

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019, si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura in pietrame disordinata*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati nella tabella sottostante:

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbalzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei quadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

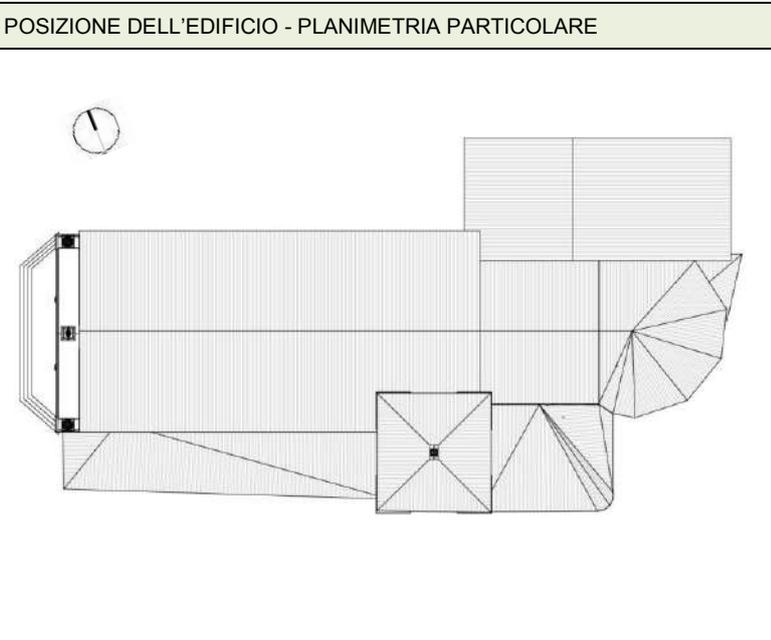
Tabella C8.5.1, valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura (Circolare 2019)

Muratura in pietrame disordinata	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	fv_0 (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	1	0,018	0	690	230	19
	max	2	0,032	0	1050	350	19
	medio	1,5	0,025	0	870	290	19

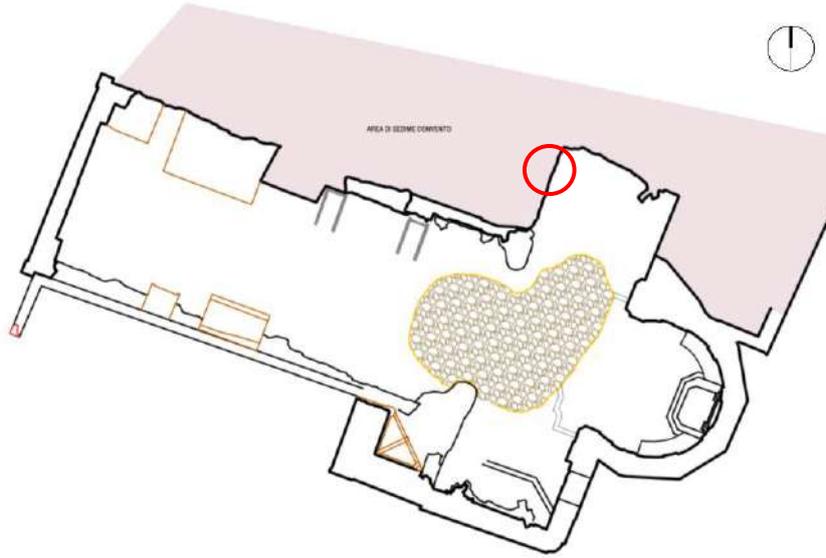
SCHEDA DI 1° LIVELLO PER IL RILIEVO DELLA TIPOLOGIA E DELLA QUALITÀ DELLA MURATURA

Parte prima

1. UBICAZIONE / IDENTIFICAZIONE		Spazio riservato					
		<i>Codici ISTAT</i>					
Regione	UMBRIA	1 0	Aggregato n°		N° Paramenti		
Provincia	PERUGIA	0 5 4	Edificio n°		N° Sezioni		
Comune	NORCIA	0 3 5	Data	/ /			
Fraz./Loc.	NORCIA		DATI CATASTALI Foglio			Allegato	
Indirizzo	PIAZZA SAN BENEDETTO		Particelle				
	N° Civico		Coordinate geografiche (ED50 – UTM 32-33)				
Sezione Censuaria			E	1 3 0 5 0 6 . 2	Fuso		
Denominazione	BASILICA DI SAN BENEDETTO DI NORCIA		N	4 2 4 7 3 2 . 4			
			Epoca di costruzione	<input type="checkbox"/> <1919	<input type="checkbox"/> '19÷'45	<input type="checkbox"/> '46÷'61	<input type="checkbox"/> '61÷'71
				<input type="checkbox"/> '72÷'81	<input type="checkbox"/> '82÷'91	<input type="checkbox"/> '92÷'01	<input checked="" type="checkbox"/> <1300



POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELLA PIANTA DELL'EDIFICIO



PIANTA STATO DI FATTO – scala 1:500

POSIZIONE DEL CAMPIONE DI MURATURA NELL'EDIFICIO

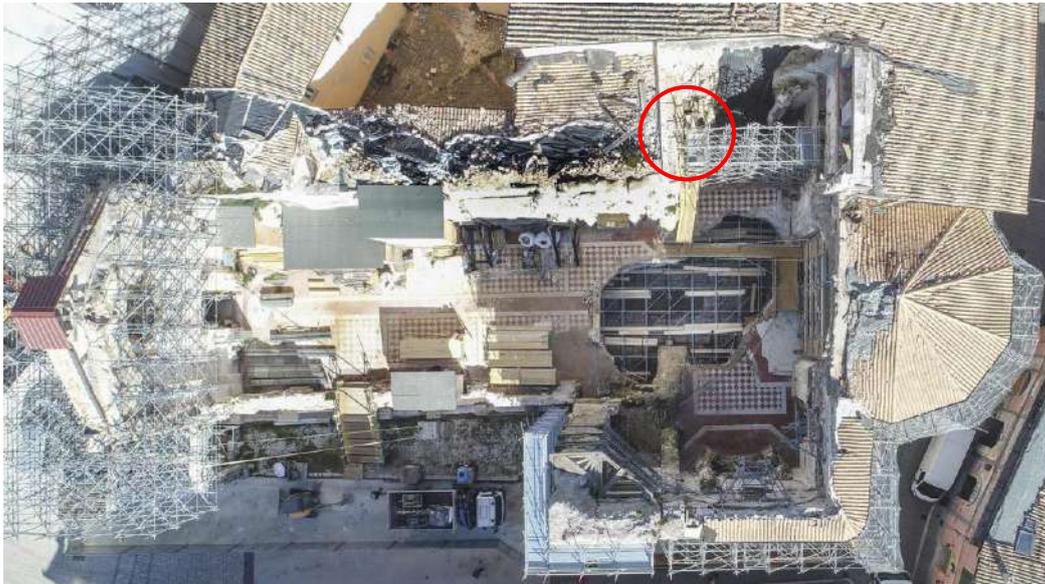
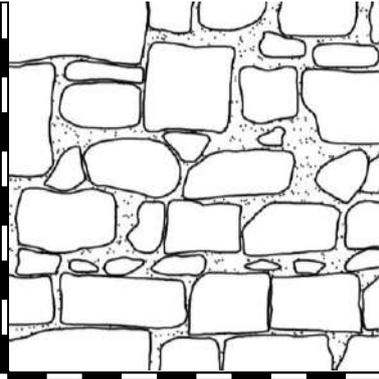


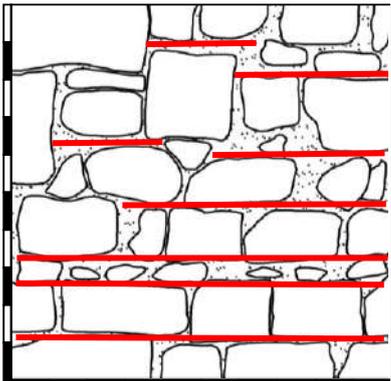
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1

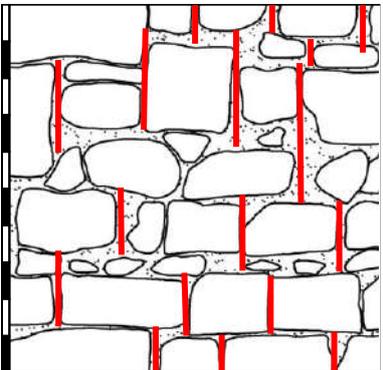
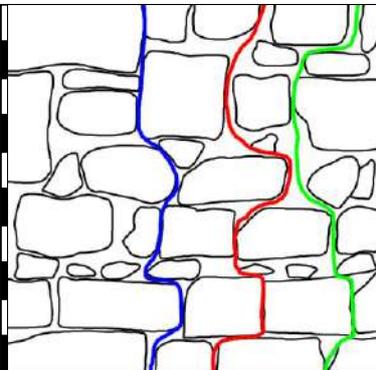
FOTO LOCALIZZAZIONE CAMPIONE 1



2. TESSITURA DEL PARAMENTO **Parte seconda**

		<p>Foto e disegni scala 1:20</p> <p>Legenda:</p> <ul style="list-style-type: none"> Pietre Vuoti Mattoni Intonaco Malta Vegetazione
---	--	---

<p>2.1 RUOLO STRUTTURALE</p> <p><input type="checkbox"/> Muratura d'ambito <input type="checkbox"/> Muratura di spina <input type="checkbox"/> Pilastro <input type="checkbox"/> Tamponamento <input checked="" type="checkbox"/> Muratura interna</p>	<p>2.2 TIPOLOGIA</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Pietra <input type="checkbox"/> Altro <input type="checkbox"/> Mattoni <input type="checkbox"/> Blocchi di tufo <input type="checkbox"/> Blocchi di cls <input type="checkbox"/> Mista</p>	<p>2.6 APPARECCHIATURA / ORIZZONTALITÀ DEI FILARI</p> <p><input type="checkbox"/> Irregolare (Orizzontamenti NR) <input checked="" type="checkbox"/> A corsi sub-orizzontali (Orizzontamenti PR) <input type="checkbox"/> A corsi orizzontali (Orizzontamenti R)</p> <div style="text-align: center;">  </div>
<p>2.3 RICORSI</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p> <p><input type="checkbox"/> In elementi più grandi <input type="checkbox"/> In mattoni <input type="checkbox"/> In cls</p>	<p>2.4 ORIZZONT./ LISTATURE</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> Presenti <input type="checkbox"/> ogni m. <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/></p>	<p>2.5 ZEPPE</p> <p>Assenti <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> In pietra <input type="checkbox"/> In cotto</p>

<p>2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (S.G. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (S.G. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (S.G. R)</p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>OSSERVAZIONI</p> <p>Il valore di LMT il prospetto, calcolato come media tra le linee di minimo tracciato, è di 126,33 cm. È presente, quindi, un mediocre ingranamento nel piano delle pareti.</p> <div style="text-align: center;">  </div>
--	--

3. CARATTERIZZAZIONE MATERIALI DEL PARAMENTO

3.1 ELEMENTI LAPIDEI			
<p>3.1.1 Tipo di Elemento</p> <p><input type="checkbox"/> Arenaria <input checked="" type="checkbox"/> Calcare <input type="checkbox"/> Travertino <input type="checkbox"/> Tufo <input type="checkbox"/> Mattoni cotti <input type="checkbox"/> Mattoni crudi <input type="checkbox"/> Altro _____</p>	<p>3.1.2 Provenienza</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Scavo locale <input type="checkbox"/> Greto del fiume <input type="checkbox"/> Cava</p>	<p>3.1.3 Lavorazione</p> <p><input type="checkbox"/> Assente <input checked="" type="checkbox"/> Appena sbazzata <input type="checkbox"/> Spigoli finiti e faccia vista non lavorata</p>	<p>3.1.4 Stato di conservazione</p> <p><input type="checkbox"/> Buono <input type="checkbox"/> Mediocre <input checked="" type="checkbox"/> Cattivo <input type="checkbox"/> Pessimo</p>
<p>3.1.5 Regolarità (forma) degli elementi</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (R.EL. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (R.EL. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (R.EL. R)</p>	<p>3.1.6 Dimensioni degli elementi</p> <p><input type="checkbox"/> Non rispettato (D.EL.) < 15 cm <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (D.EL.) 15 cm + 25 cm <input type="checkbox"/> Rispettato (D.EL.) > 25 cm</p>		

3.2 MALTA		3.2.7 Qualità della malta /Stato di conservazione /Aderenza
<p>3.2.1 Funzione</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Allettamento <input type="checkbox"/> Stilatura <input type="checkbox"/> Riempimento</p> <p>3.2.2 Consistenza</p> <p><input type="checkbox"/> Incoerente <input type="checkbox"/> Friabile <input checked="" type="checkbox"/> Compatta <input type="checkbox"/> Tenace</p> <p>3.2.3 Colore malta GRIGIO</p>	<p>3.2.5 Tipo di aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Sabbia <input checked="" type="checkbox"/> Ghiaietto <input type="checkbox"/> Ghiaia</p> <p>3.2.6 Forma dell'aggregato</p> <p><input type="checkbox"/> Arrotondata <input checked="" type="checkbox"/> Spigolosa</p> <p>3.2.4 Colore aggr. GRIGIO</p>	<p><input type="checkbox"/> Non rispettato (MA. NR) <input checked="" type="checkbox"/> Parzialmente rispettato (MA. PR) <input type="checkbox"/> Rispettato (MA. R)</p>

La muratura, in base all'osservazione visiva dei parametri della regola dell'arte non risulta essere di buona qualità.

L'indice di qualità muraria IQM risulta infatti essere:

$$IQM_V = 2,45$$

$$IQM_{NP} = 2,1$$

$$IQM_{FP} = 2,1$$

La muratura risulta quindi rientrare in classe C per tutte le tre tipologie di azione.

Per quanto riguarda l'analisi della qualità muraria mediante la linea di minimo tracciato LMT, calcolata sul paramento, risulta essere di 123,66 cm e la muratura in questione è quindi una muratura di livello 2, M2.

ATTRIBUZIONE DI UNA DELLE TIPOLOGIE MURARIE

Correlazione IQM con parametri meccanici muratura	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
	medio		2,2	0,039	0,09	1068,9

Riferendo questi valori ai parametri meccanici della muratura, così come presenti al Capitolo 8 relativo alle costruzioni esistenti della Circolare 2019, si nota come essi siano assimilabili alla muratura descritta come *muratura a conci sbazzati con paramento di spessore disomogeneo*, i cui valori minimi, massimi e medi sono riportati nella tabella sottostante:

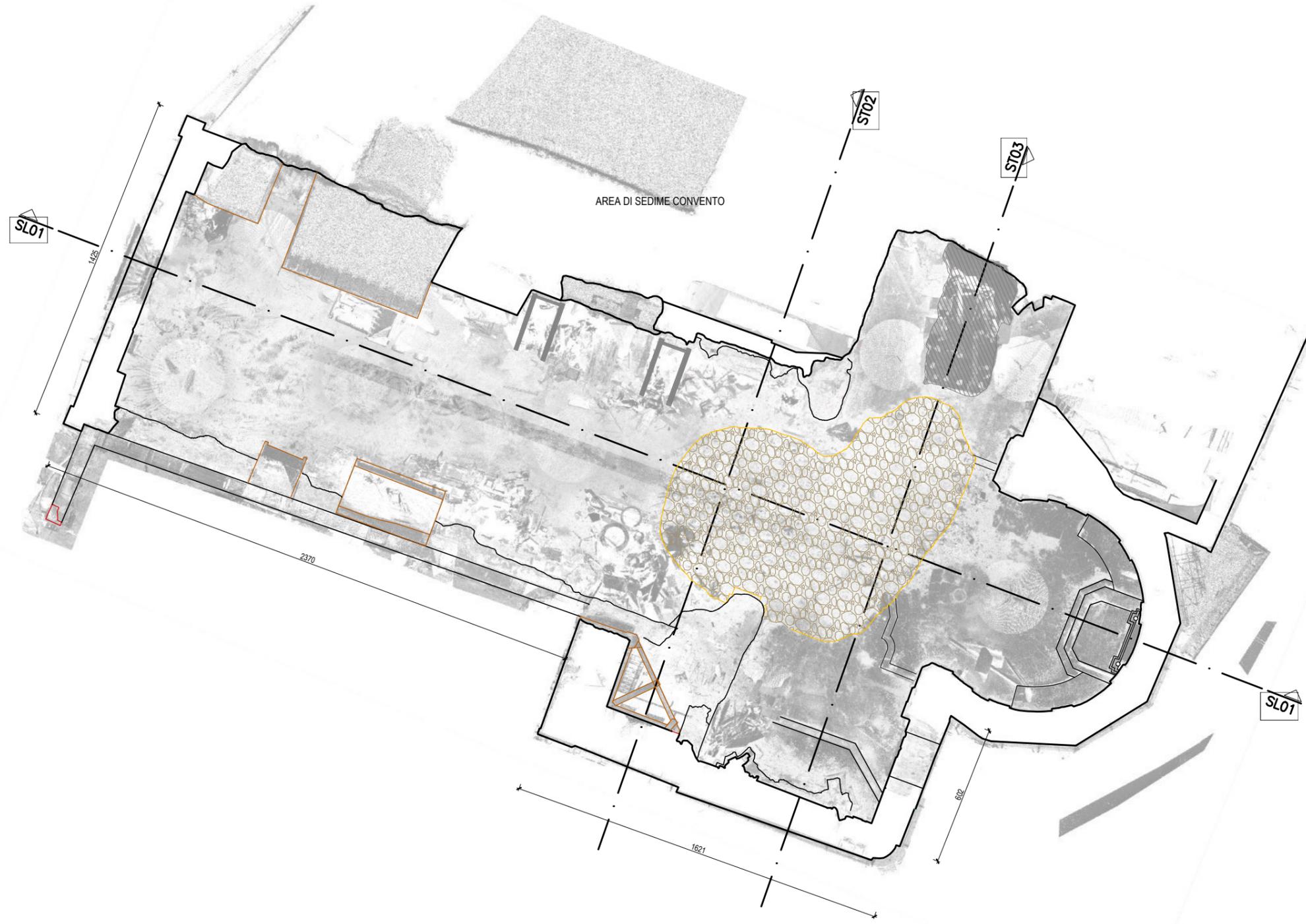
Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Tabella C8.5.1, valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura (Circolare 2019)

Muratura a conci sbazzati, con paramenti di limitato spessore disomogeneo	Valori	f_m (N/mm ²)	T_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min	2	0,035	0	1020	340	20
	max	2	0,051	0	1440	480	20
	medio	2	0,043	0	1230	410	20

C - TAVOLE DI RILIEVO DELLO STATO DI FATTO

PIANTA QUOTA 613 M
scala 1:200



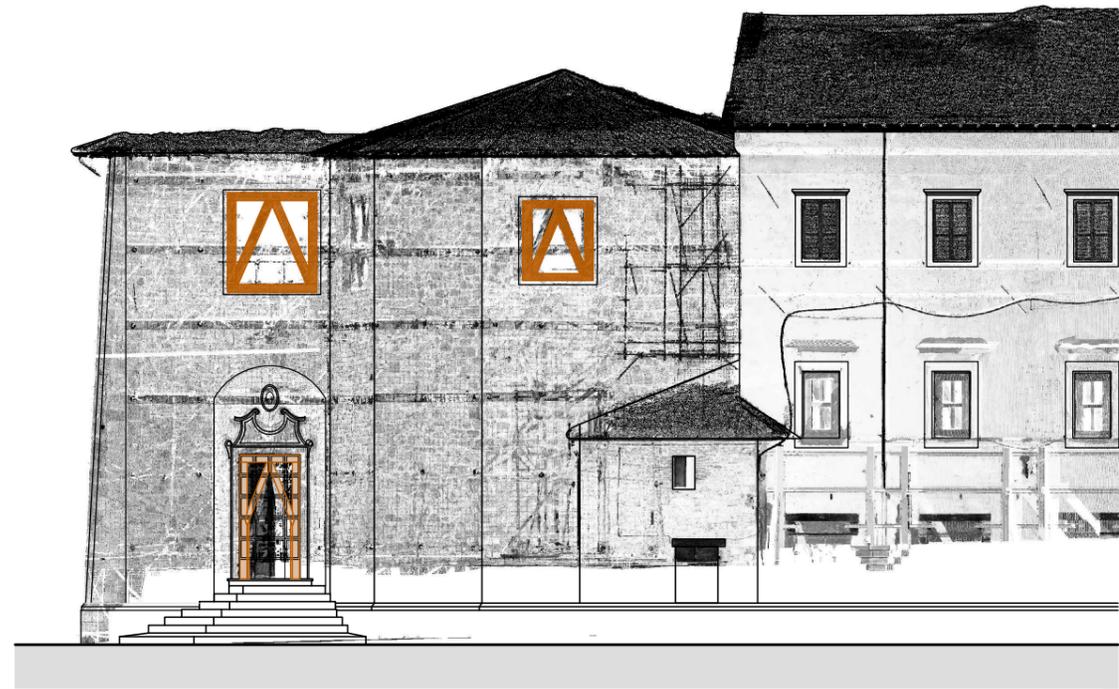
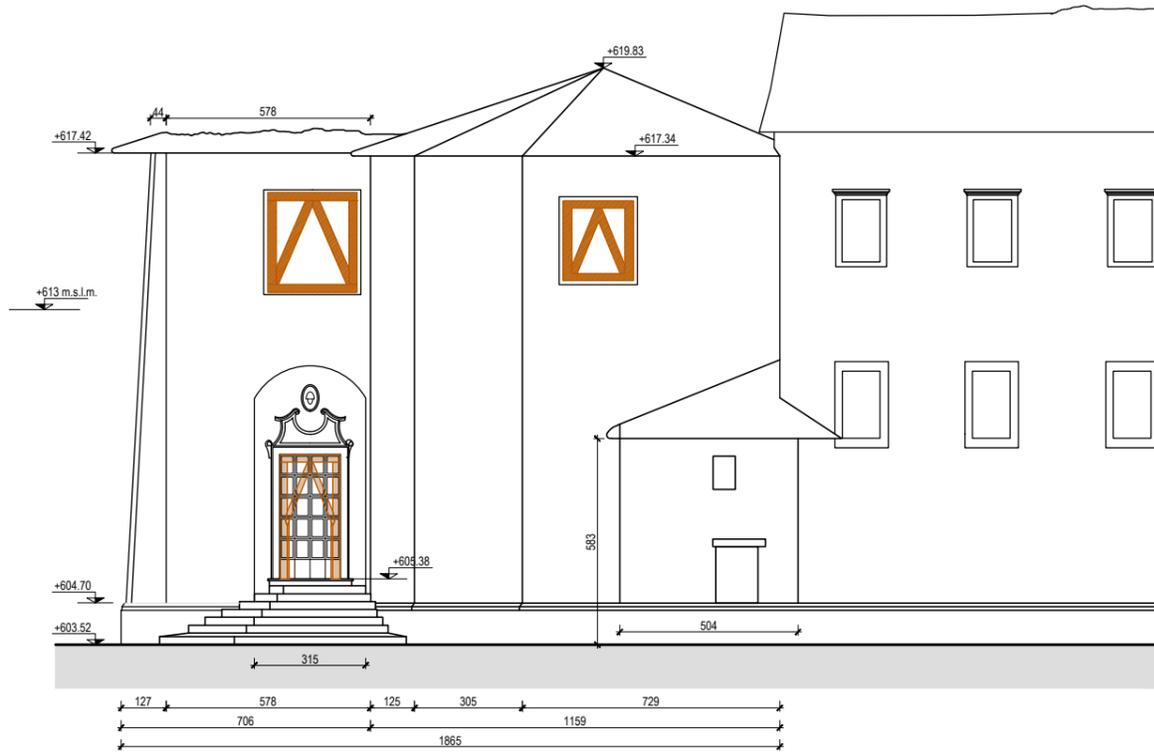
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

CONVENZIONE DI RICERCA INTERDIPARTIMENTALE
SULLA BASILICA DI SAN BENEDETTO A NORCIA TRA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E UFFICIO
SOPRINTENDENTE SPECIALE MIBACT

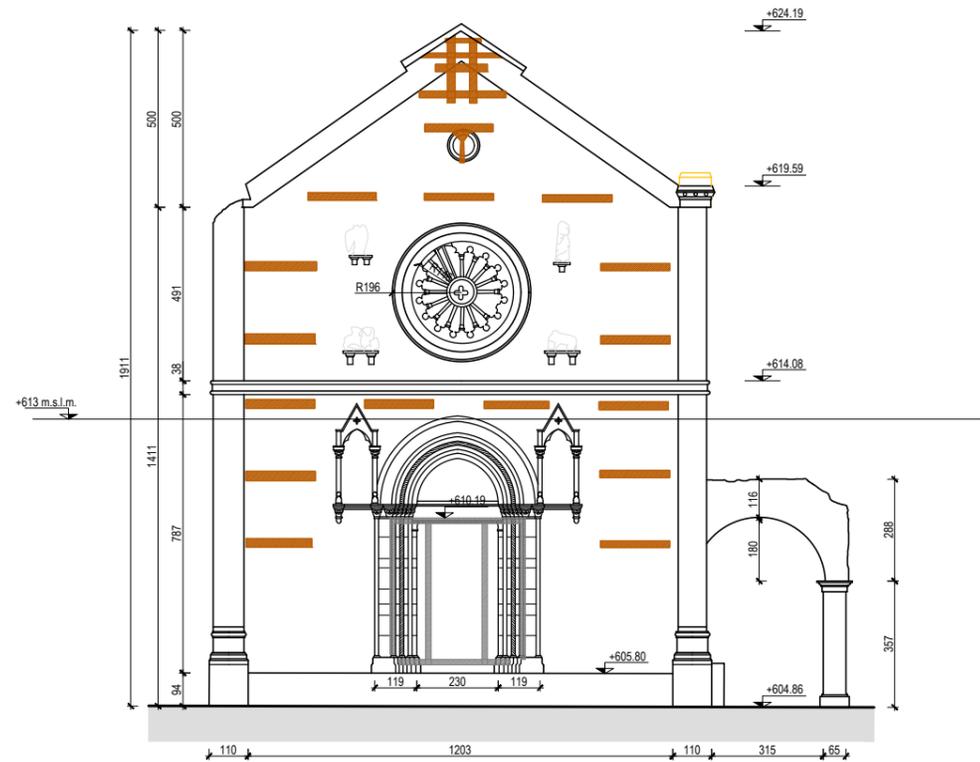
Tesi di Laurea Magistrale - Ingegneria Edile - Architettura
Relatrice: Prof.ssa M.R. Valluzzi
Correlatori: E. Cescatti, M. Secco, C. Zanchetta
Laureanda: Pagan Kelly

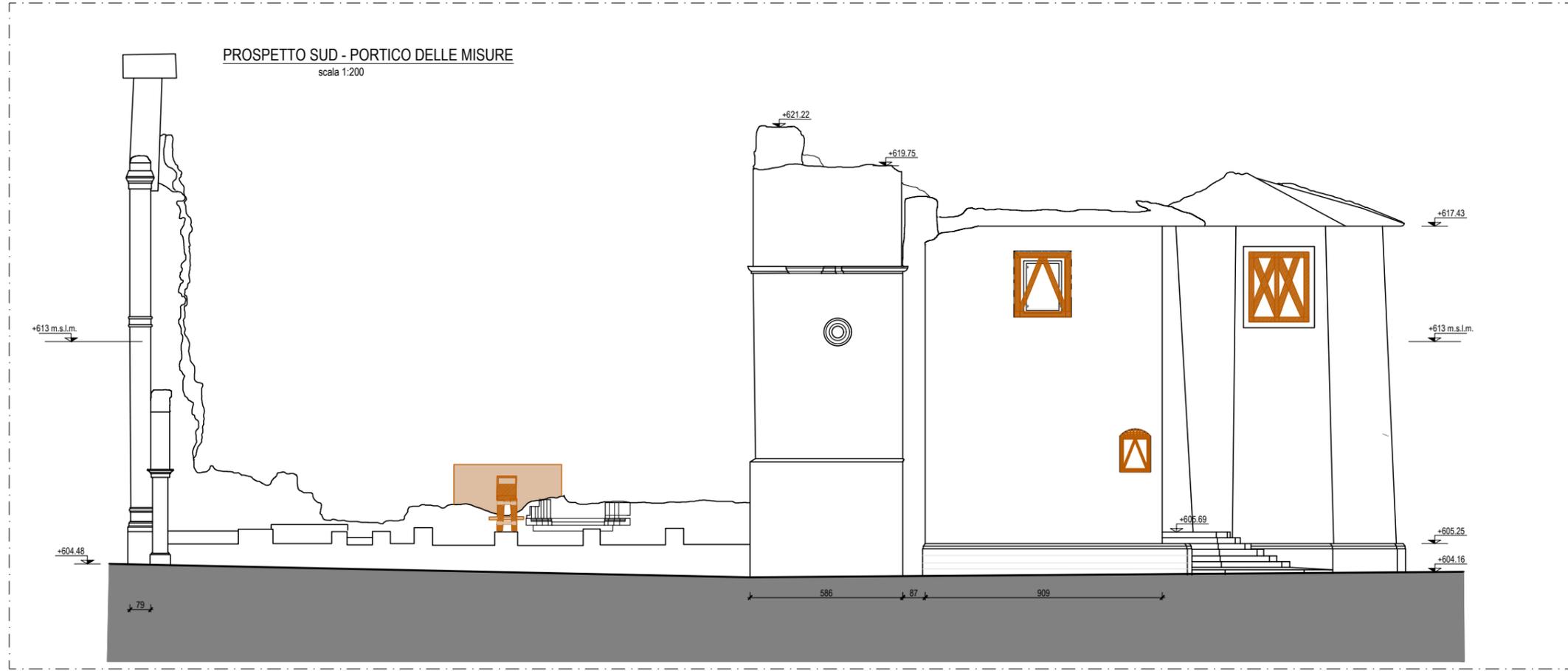
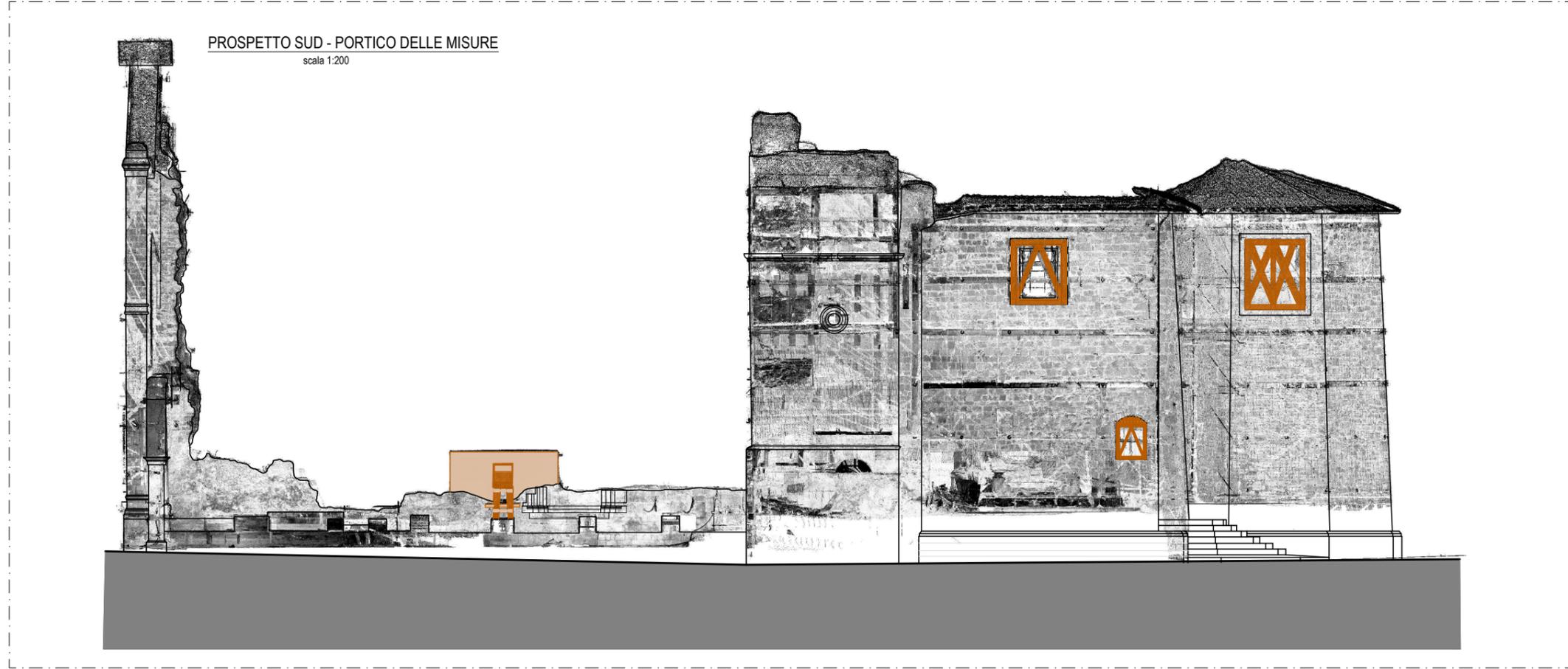
RILIEVO - STATO DI FATTO
T01_ PIANTA

PROSPETTO EST - ABSIDE
scala 1:200



PROSPETTO OVEST - FACCIATA
scala 1:200





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

CONVENZIONE DI RICERCA INTERDIPARTIMENTALE
SULLA BASILICA DI SAN BENEDETTO A NORCIA TRA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E UFFICIO
SORPRINTENDENTE SPECIALE MIBACT

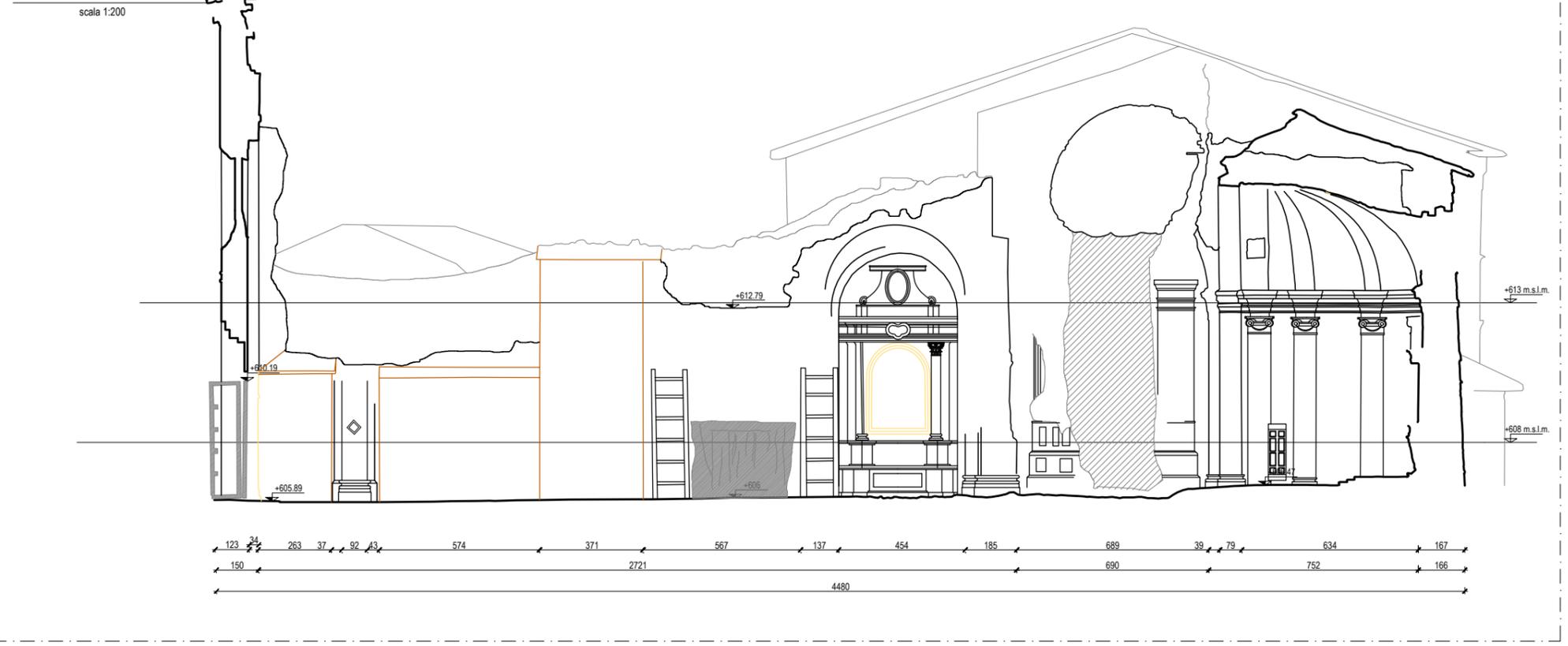
Tesi di Laurea Magistrale - Ingegneria Edile - Architettura
Relatrice: Prof.ssa M.R. Valluzzi
Correlatori: E. Cescatti, M. Secco, C. Zanchetta
Laureanda: Pagan Kelly

RILIEVO - STATO DI FATTO
T03_PROSPETTO PORTICO
DELLE MISURE

SEZIONE LONGITUDINALE SL1
scala 1:200



SEZIONE LONGITUDINALE SL1
scala 1:200



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

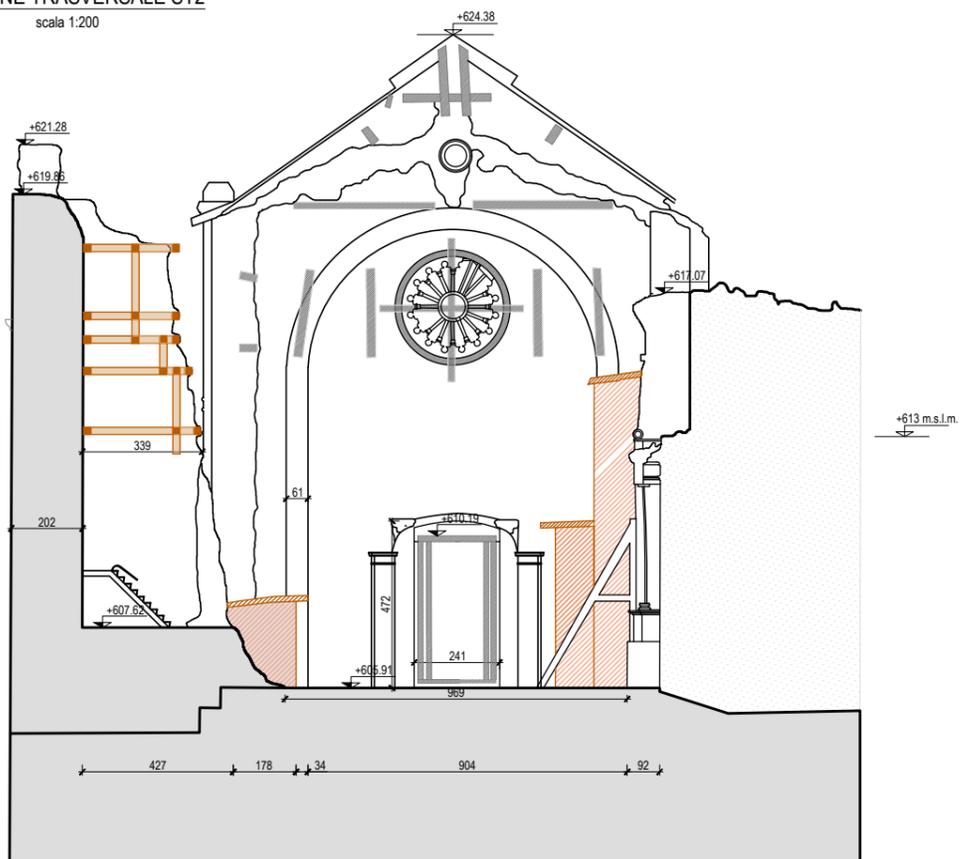
CONVENZIONE DI RICERCA INTERDIPARTIMENTALE
SULLA BASILICA DI SAN BENEDETTO A NORCIA TRA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E UFFICIO
SORPRINTENDENTE SPECIALE MIBACT

Tesi di Laurea Magistrale - Ingegneria Edile - Architettura
Relatrice: Prof.ssa M.R. Valluzzi
Correlatori: E. Cescatti, M. Secco, C. Zanchetta
Laureanda: Pagan Kelly

RILIEVO - STATO DI FATTO
T04_SEZIONE
LONGITUDINALE

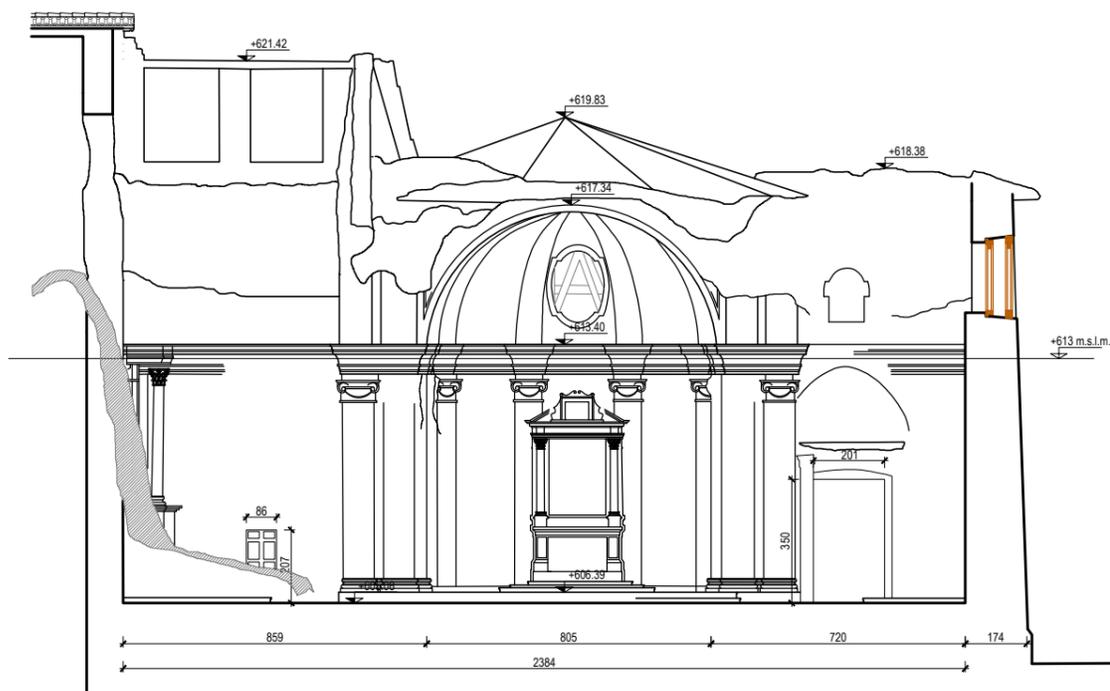
SEZIONE TRASVERSALE ST2

scala 1:200



SEZIONE TRASVERSALE ST3

scala 1:200



SEZIONE TRASVERSALE ST2

scala 1:200

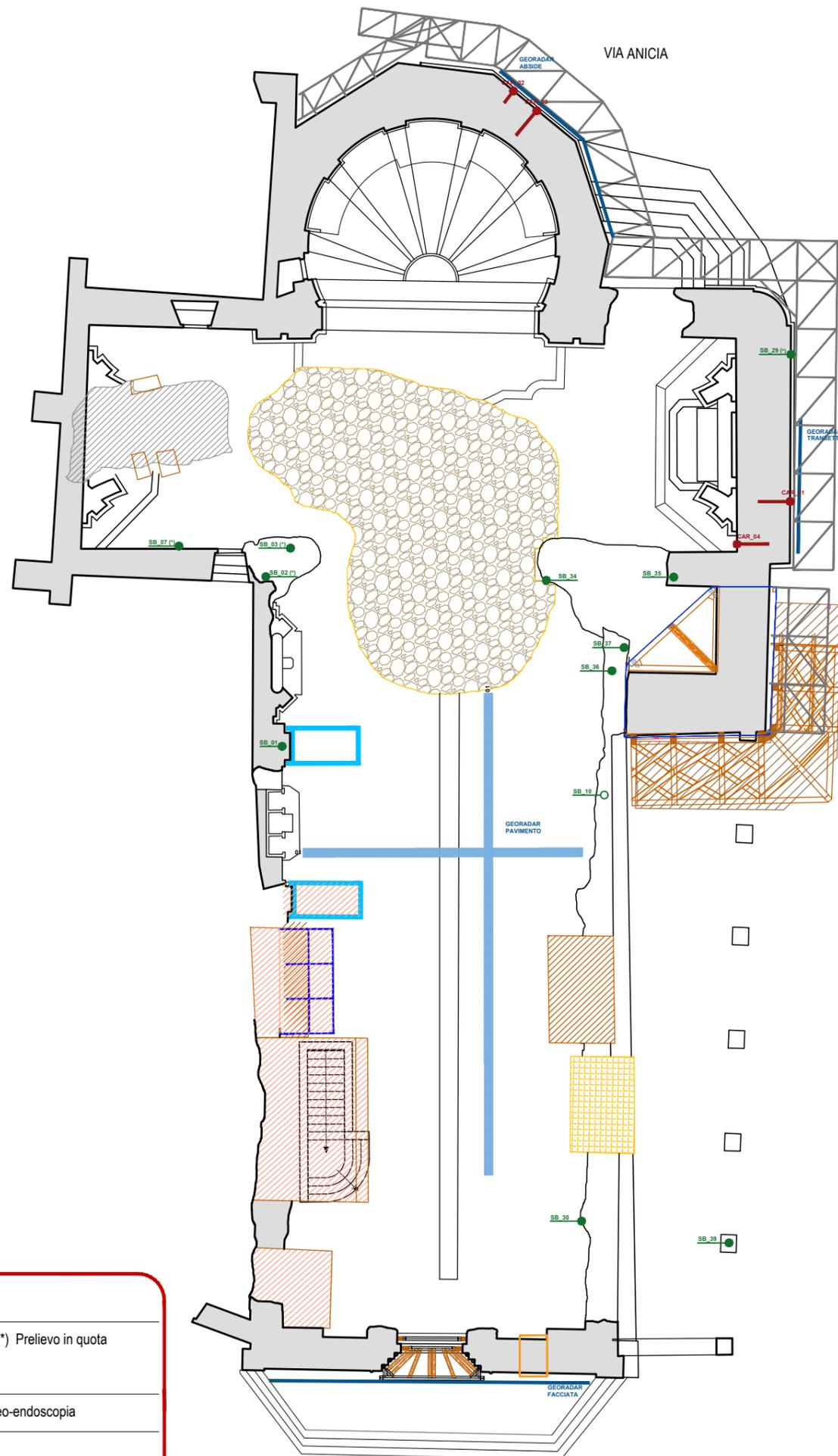


SEZIONE TRASVERSALE ST3

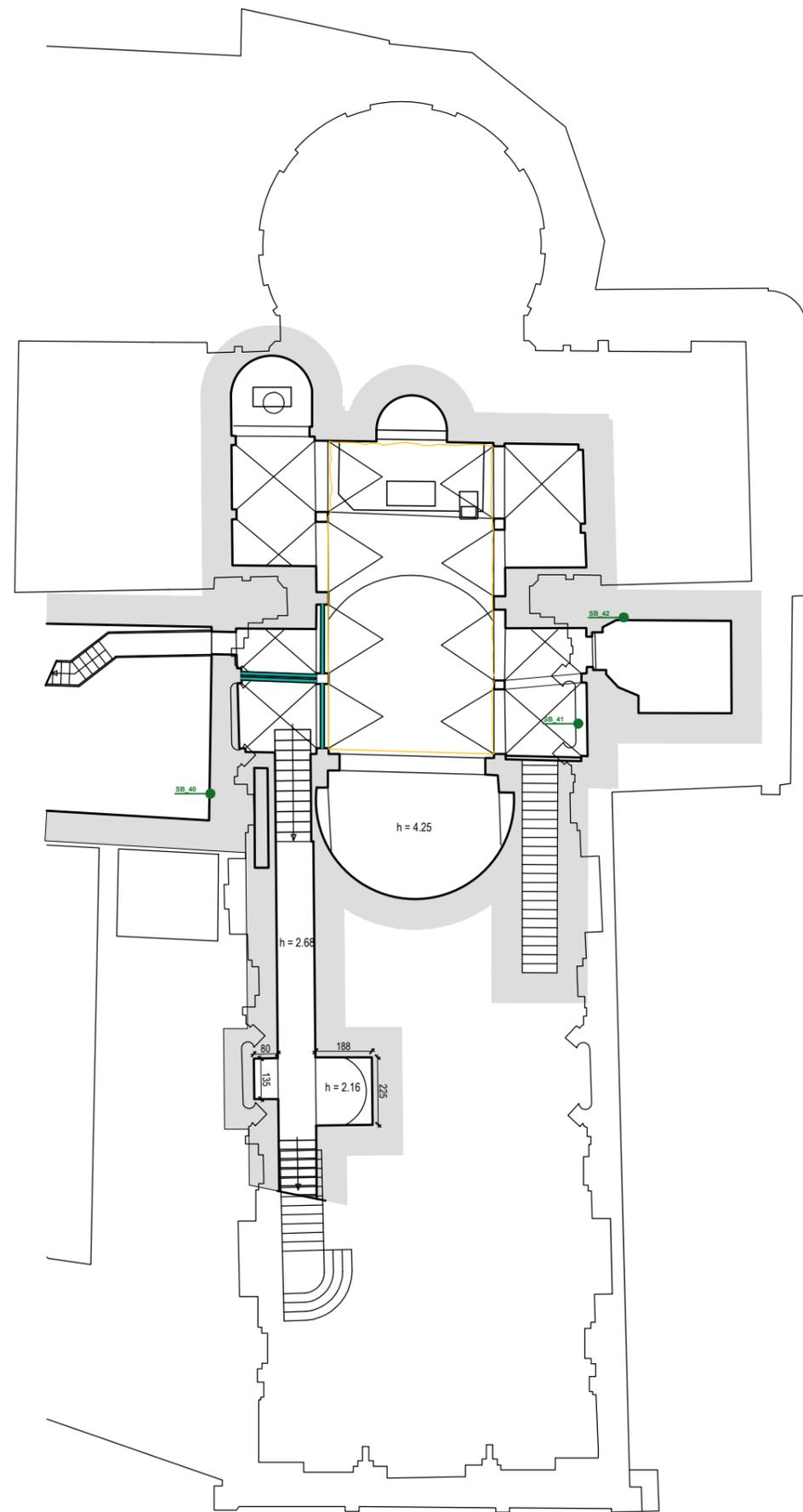
scala 1:200



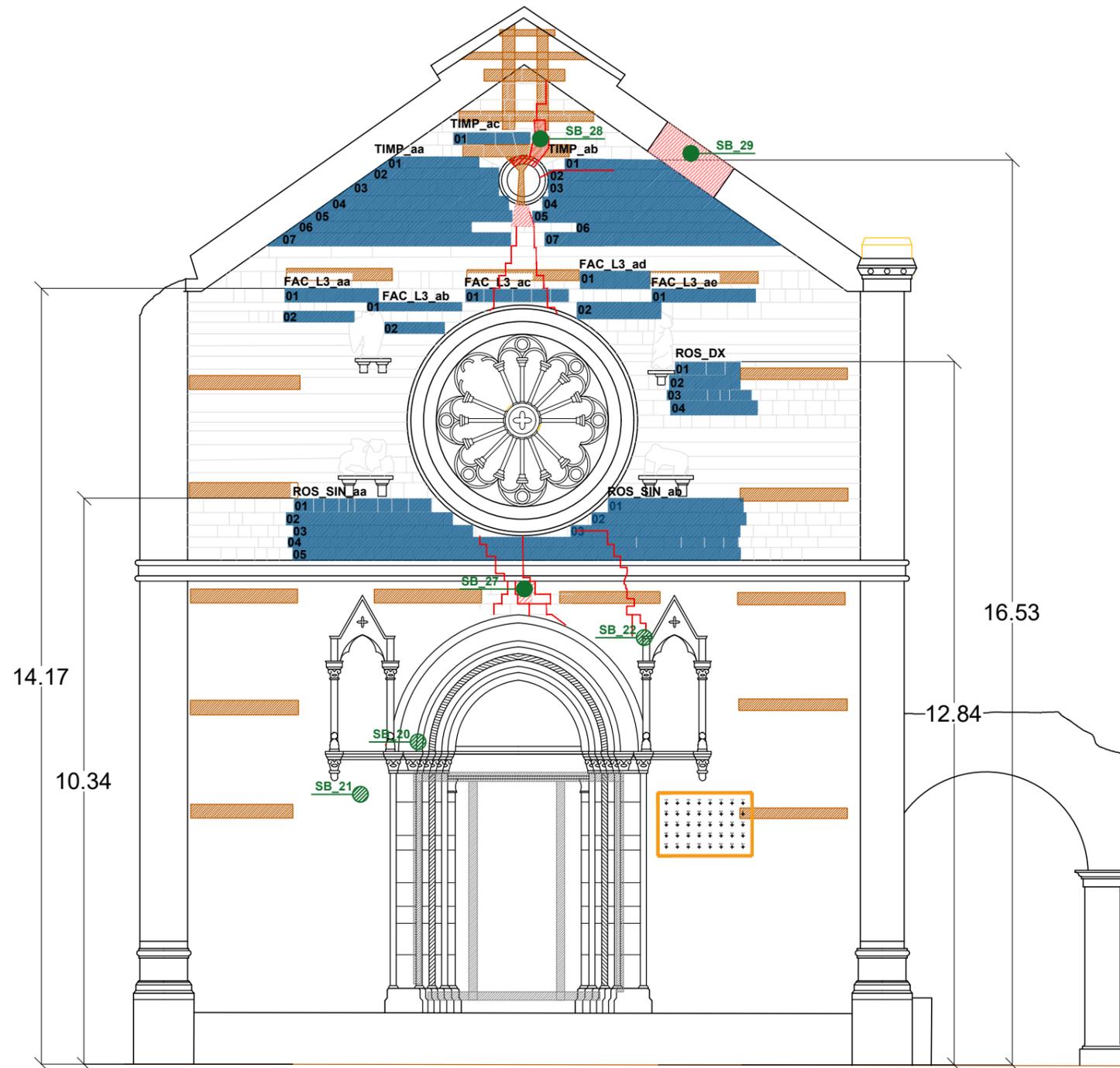
D - TAVOLE RISULTATI INDAGINI



PIANTE
Scala 1:100



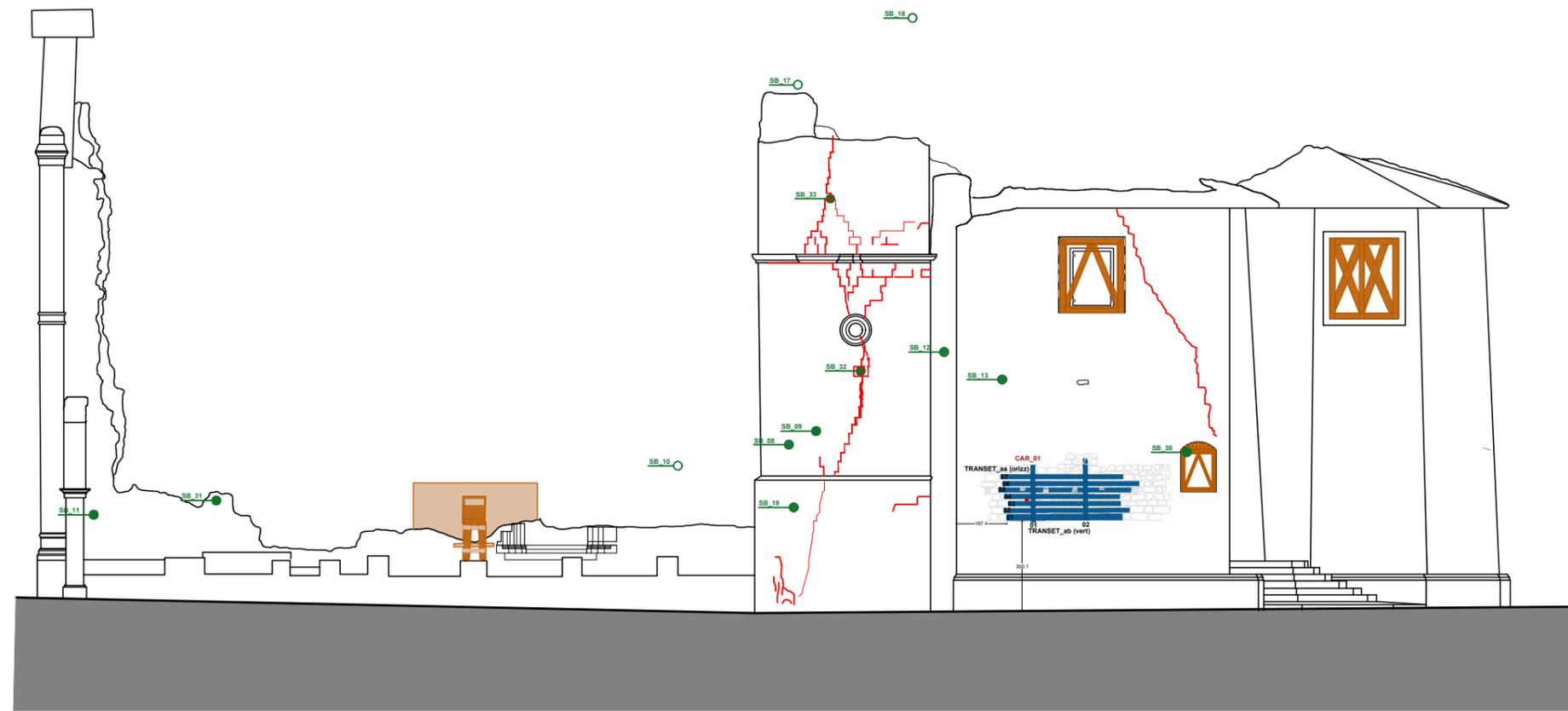
ID PROVA	Descrizione prova
●	n° 41 Prelevi di materiali leganti (*) Prelievo in quota
●	Prelievo da lato interno
○	Prelievo in parti crollate o smontate
●	n° 4 Carotaggio Ø 36 su muratura con video-endoscopia
■	n° 5 Zone di indagine GEORADAR
□	n° 1 Prove soniche e/o tomografiche



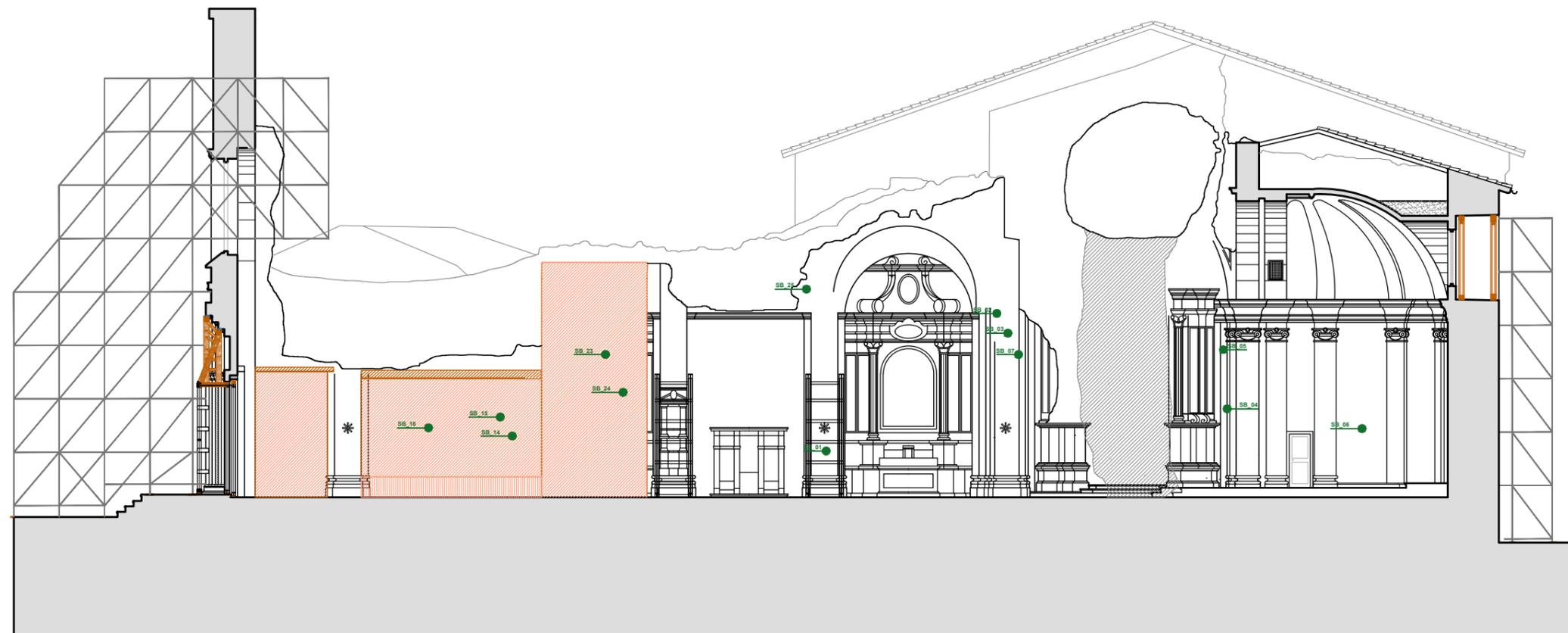
FACCIATA
Scala 1:100

ID PROVA	Descrizione prova
●	n° 41 Prelievi di materiali leganti (*) Prelievo in quota
●	Prelievo da lato interno
○	Prelievo in parti crollate o smontate
●	n° 4 Carotaggio Ø 36 su muratura con video-endoscopia
■	n° 5 Zone di indagine GEORADAR
□	n° 1 Prove soniche e/o tomografiche





PROSPETTO SUD - LATO PORTICO MISURE
Scala 1:200



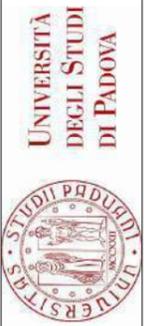
SEZIONE LONGITUDINALE
Scala 1:200

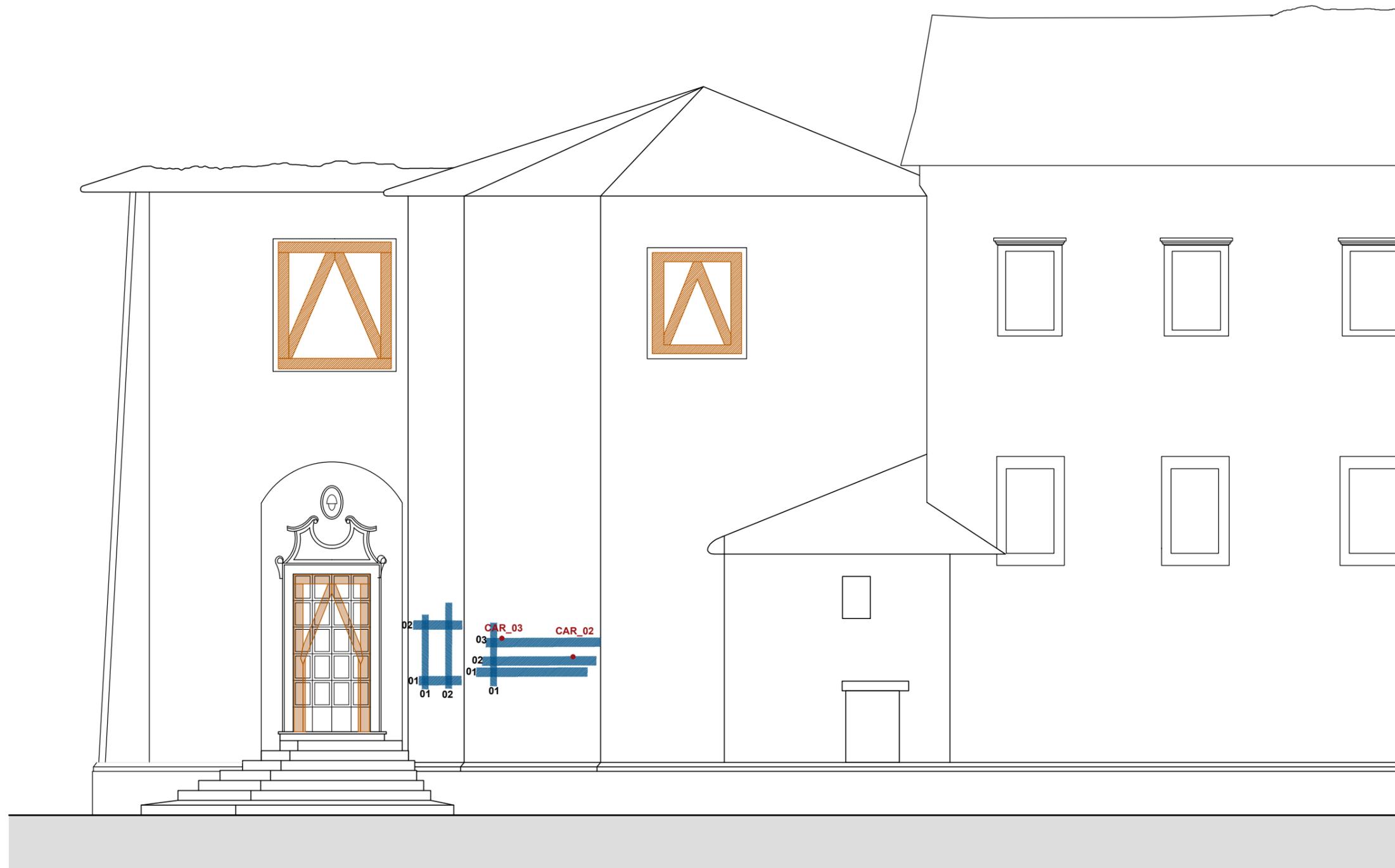
ID PROVA	Descrizione prova
●	n° 41 Prelievi di materiali leganti (*) Prelievo in quota
●	Prelievo da lato interno
○	Prelievo in parti crollate o smontate
●	n° 4 Carotaggio Ø 36 su muratura con video-endoscopia
■	n° 5 Zone di indagine GEORADAR
□	n° 1 Prove soniche e/o tomografiche

RISULTATI DELLE INDAGINI
LOCALIZZAZIONE PROVE
T03_PROSPETTO SUD E
SEZIONE LONGITUDINALE

Tesi di Laurea Magistrale - Ingegneria Edile - Architettura
Relatrice: Prof.ssa M.R. Valluzzi
Correlatori: E. Cescatti, M. Secco, C.Zanchetta
Laureanda: Pagan Kelly

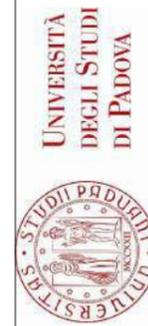
CONVENZIONE DI RICERCA INTERDIPARTIMENTALE
SULLA BASILICA DI SAN BENEDETTO A NORCIA TRA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E UFFICIO
SORPRENDENTE SPECIALE MIBACT





ABSIDE ESTERNO
Scala 1:100

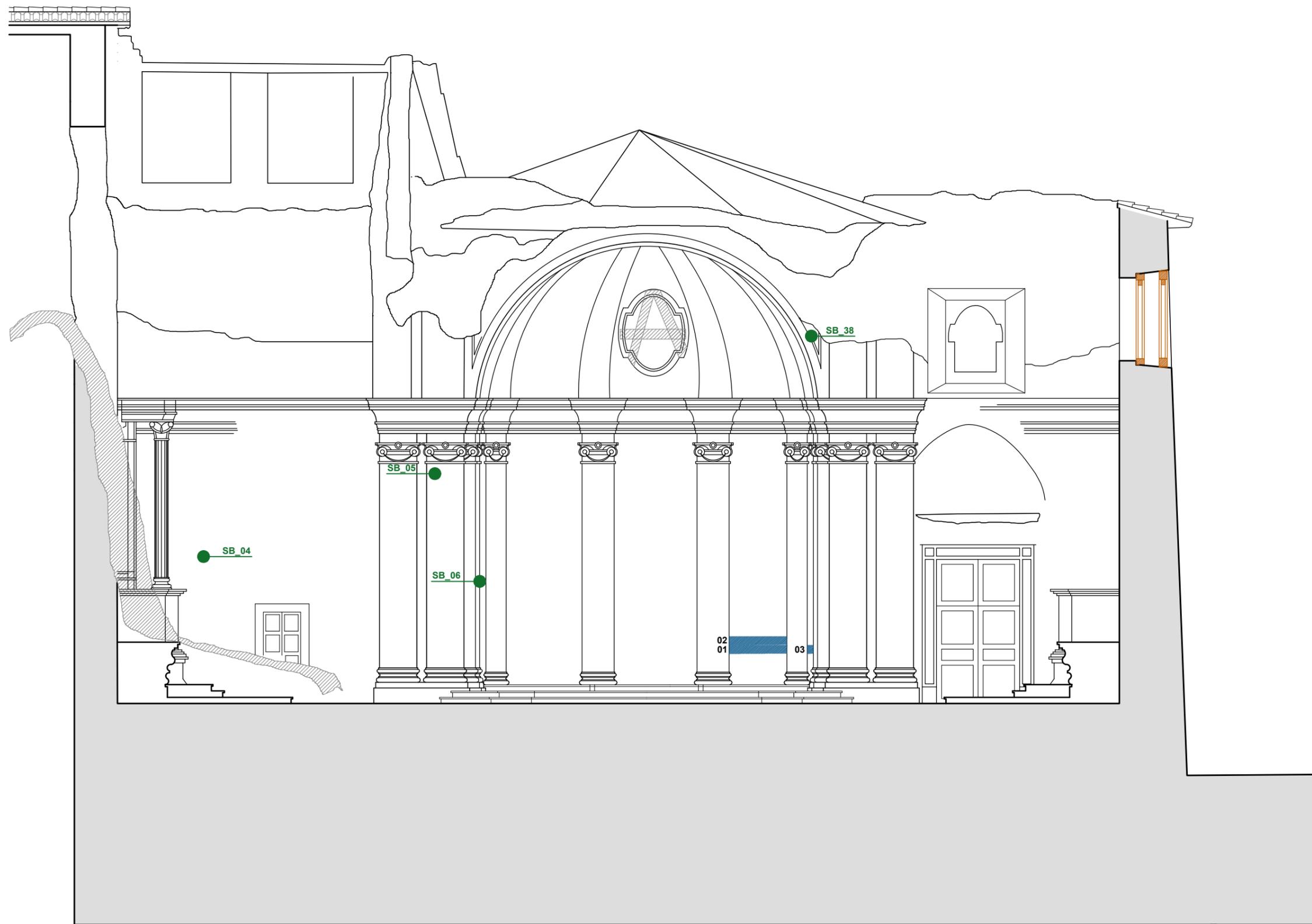
ID PROVA	Descrizione prova
●	n° 41 Prelievi di materiali leganti (*) Prelievo in quota
●	Prelievo da lato interno
○	Prelievo in parti crollate o smontate
●	n° 4 Carotaggio Ø 36 su muratura con video-endoscopia
■	n° 5 Zone di indagine GEORADAR
□	n° 1 Prove soniche e/o tomografiche



CONVENZIONE DI RICERCA INTERDIPARTIMENTALE
SULLA BASILICA DI SAN BENEDETTO A NORCIA TRA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E UFFICIO
SORINTENDENTE SPECIALE MIBACT

Tesi di Laurea Magistrale - Ingegneria Edile - Architettura
Relatrice: Prof.ssa M.R. Valluzzi
Correlatori: E. Cescatti, M. Secco, C. Zanchetta
Laureanda: Pagan Kelly

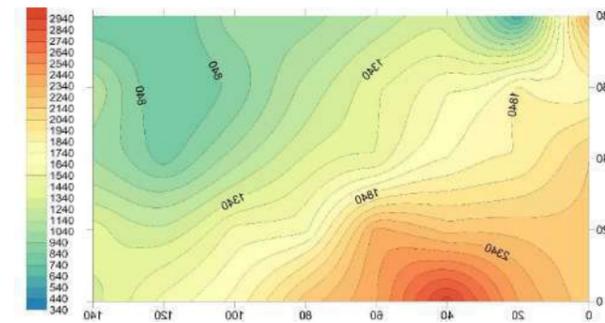
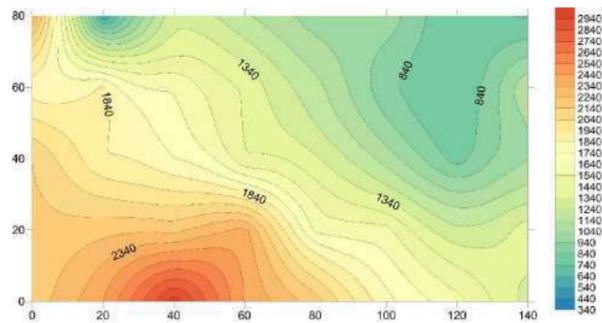
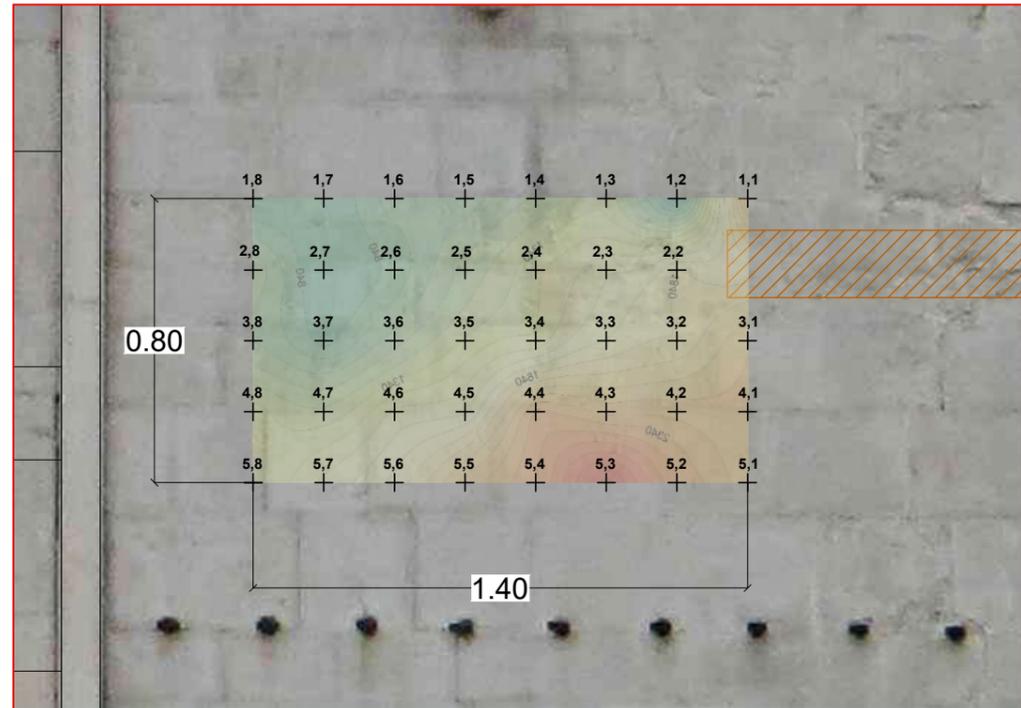
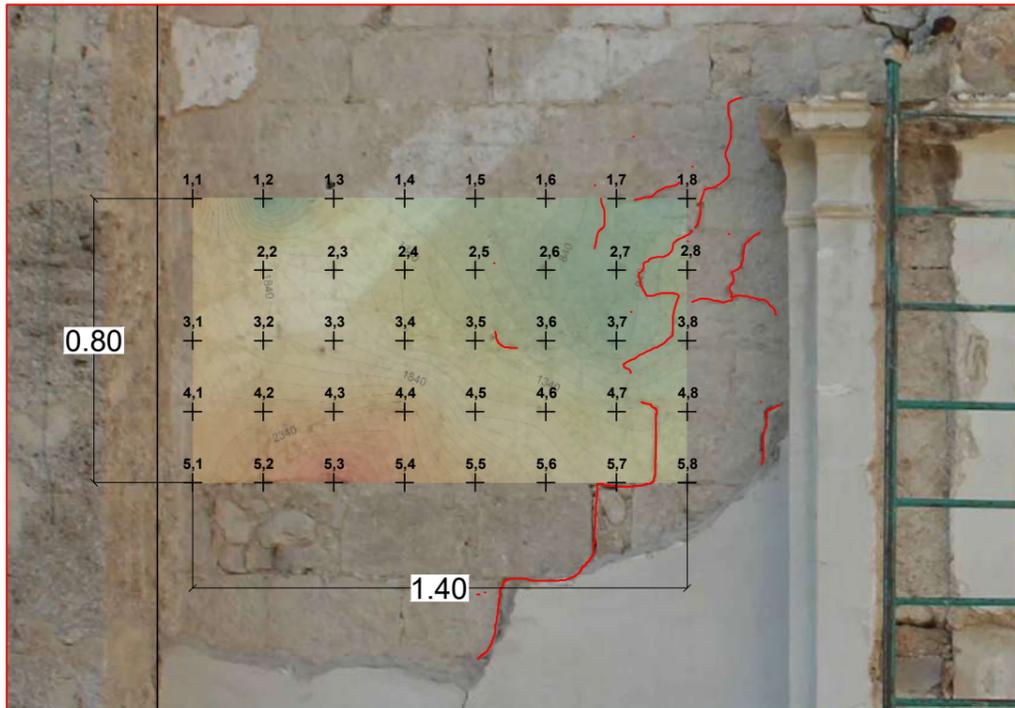
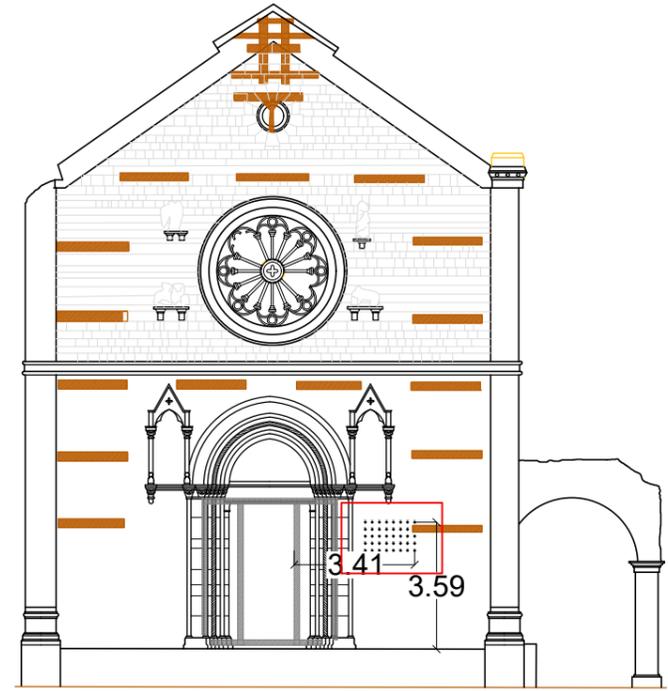
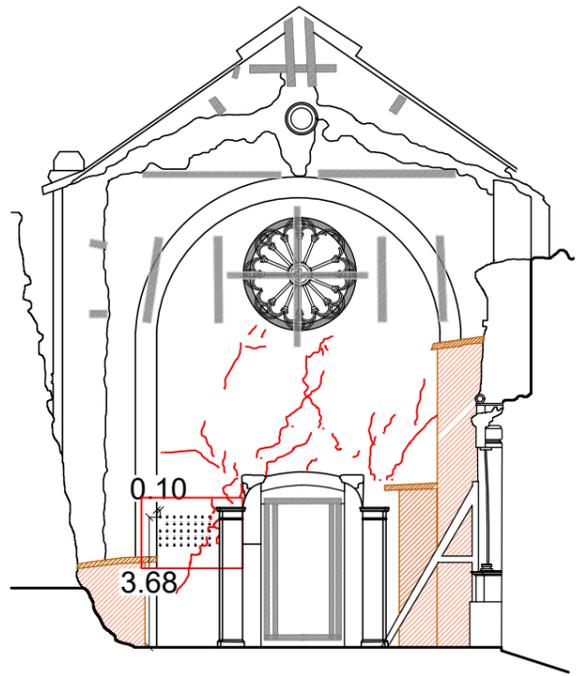
RISULTATI DELLE INDAGINI
LOCALIZZAZIONE PROVE
T04_ ABSIDE ESTERNO

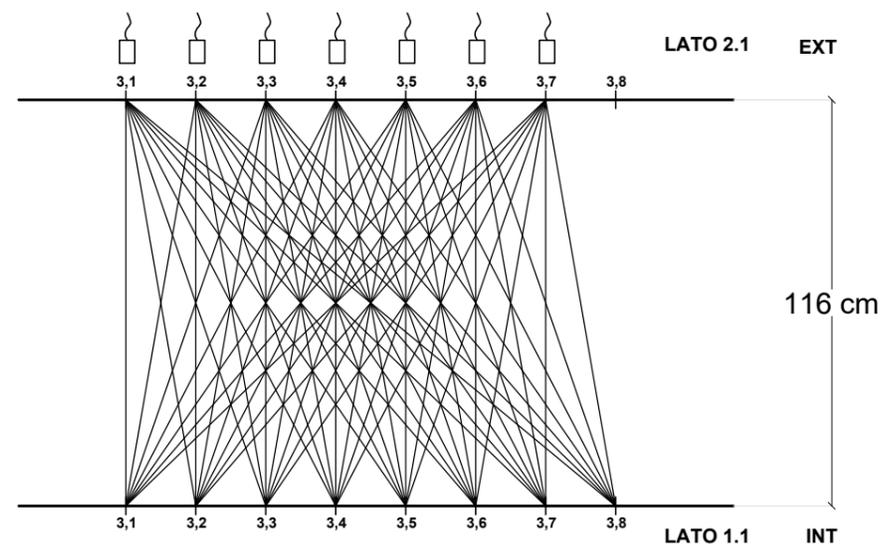
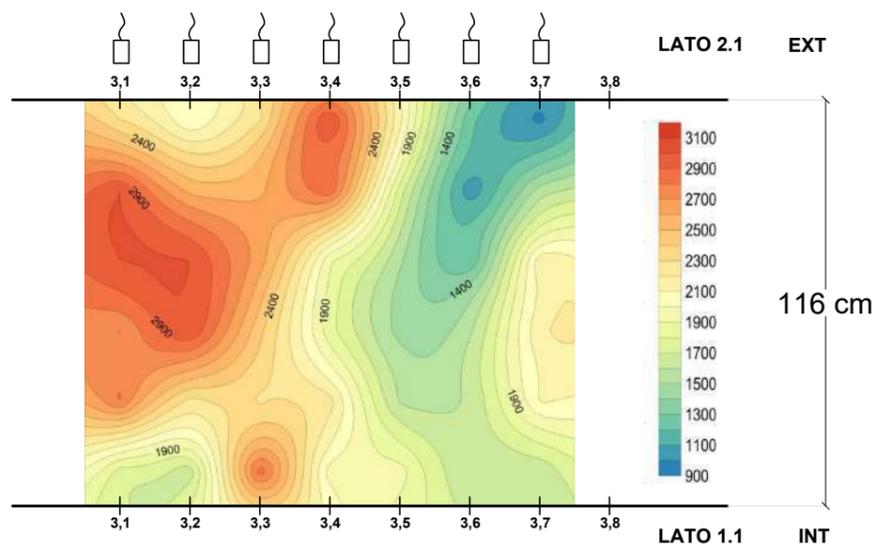
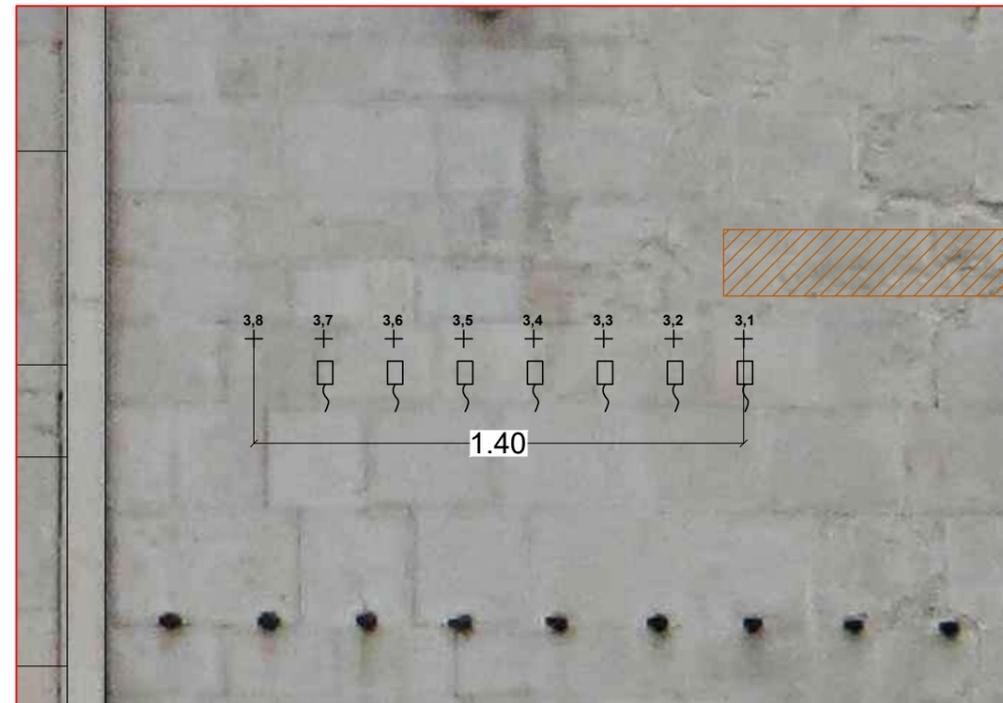
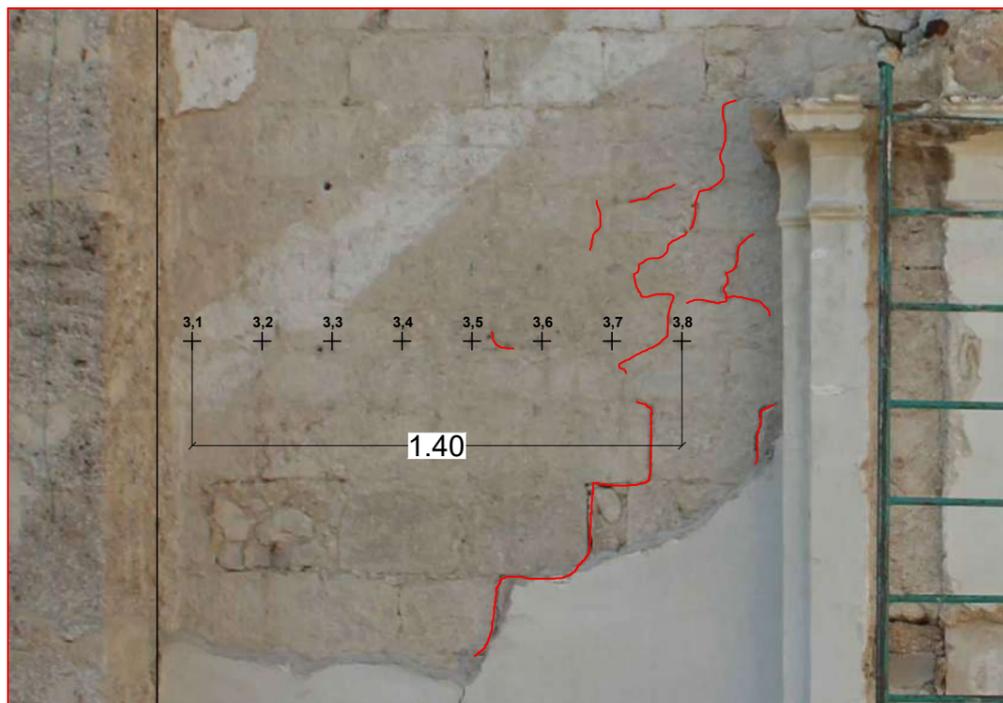
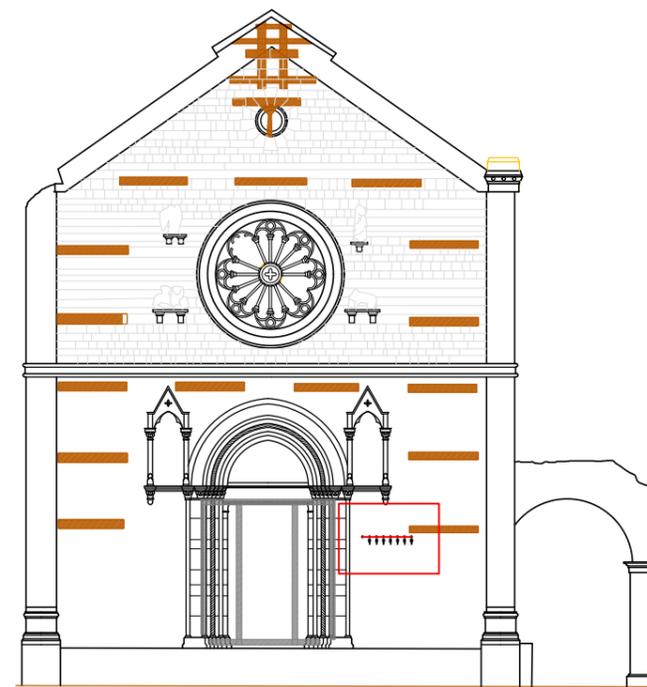
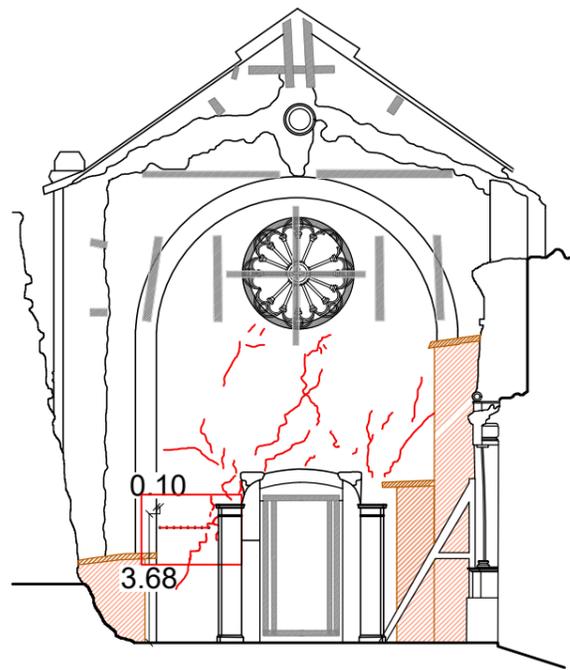


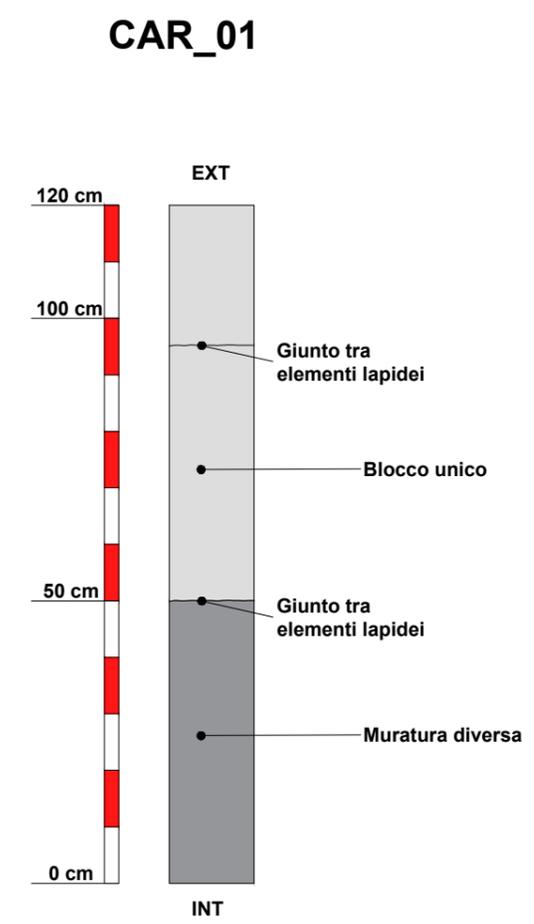
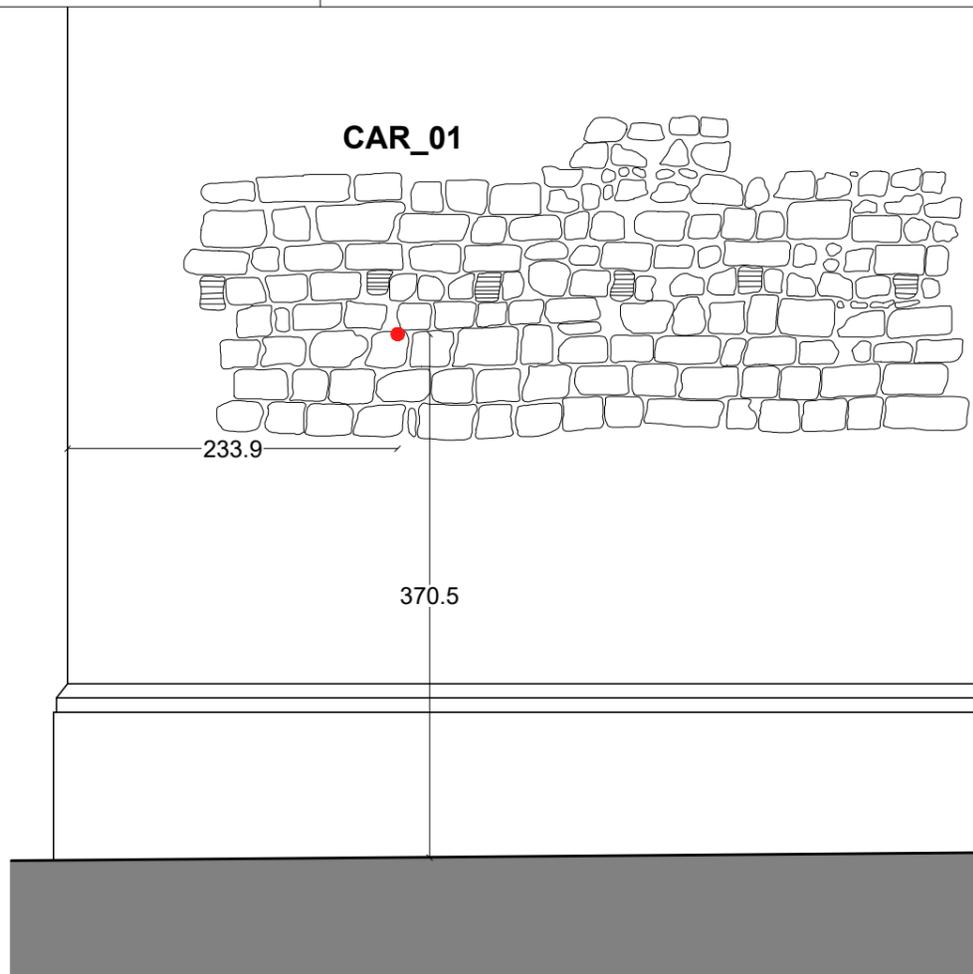
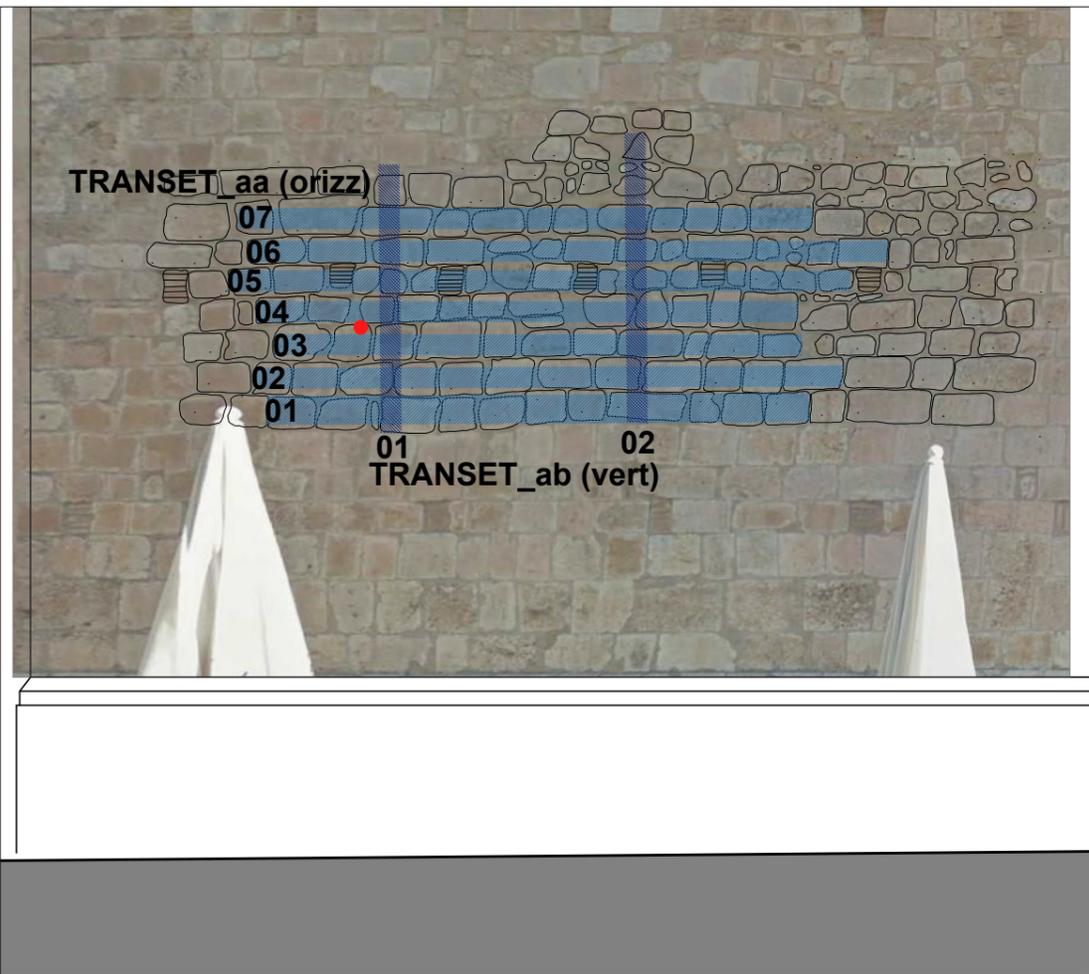
ABSIDE INTERNO
Scala 1:100

ID PROVA	Descrizione prova
●	n° 41 Prelievi di materiali leganti (*) Prelievo in quota
●	Prelievo da lato interno
○	Prelievo in parti crollate o smontate
●	n° 4 Carotaggio Ø 36 su muratura con video-endoscopia
■	n° 5 Zone di indagine GEORADAR
□	n° 1 Prove soniche e/o tomografiche



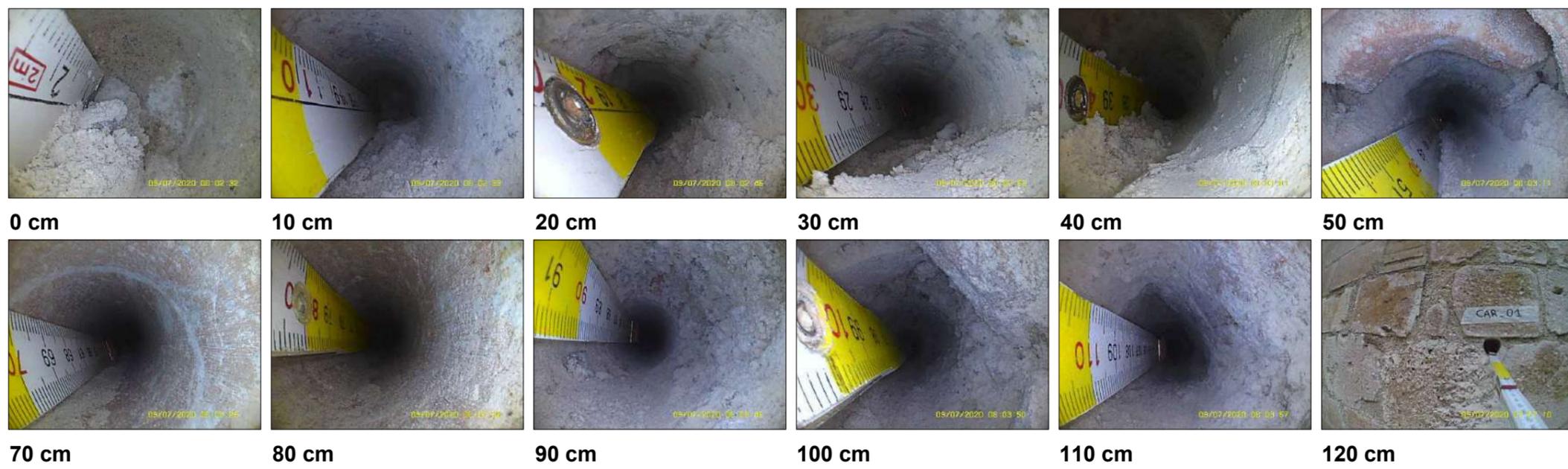


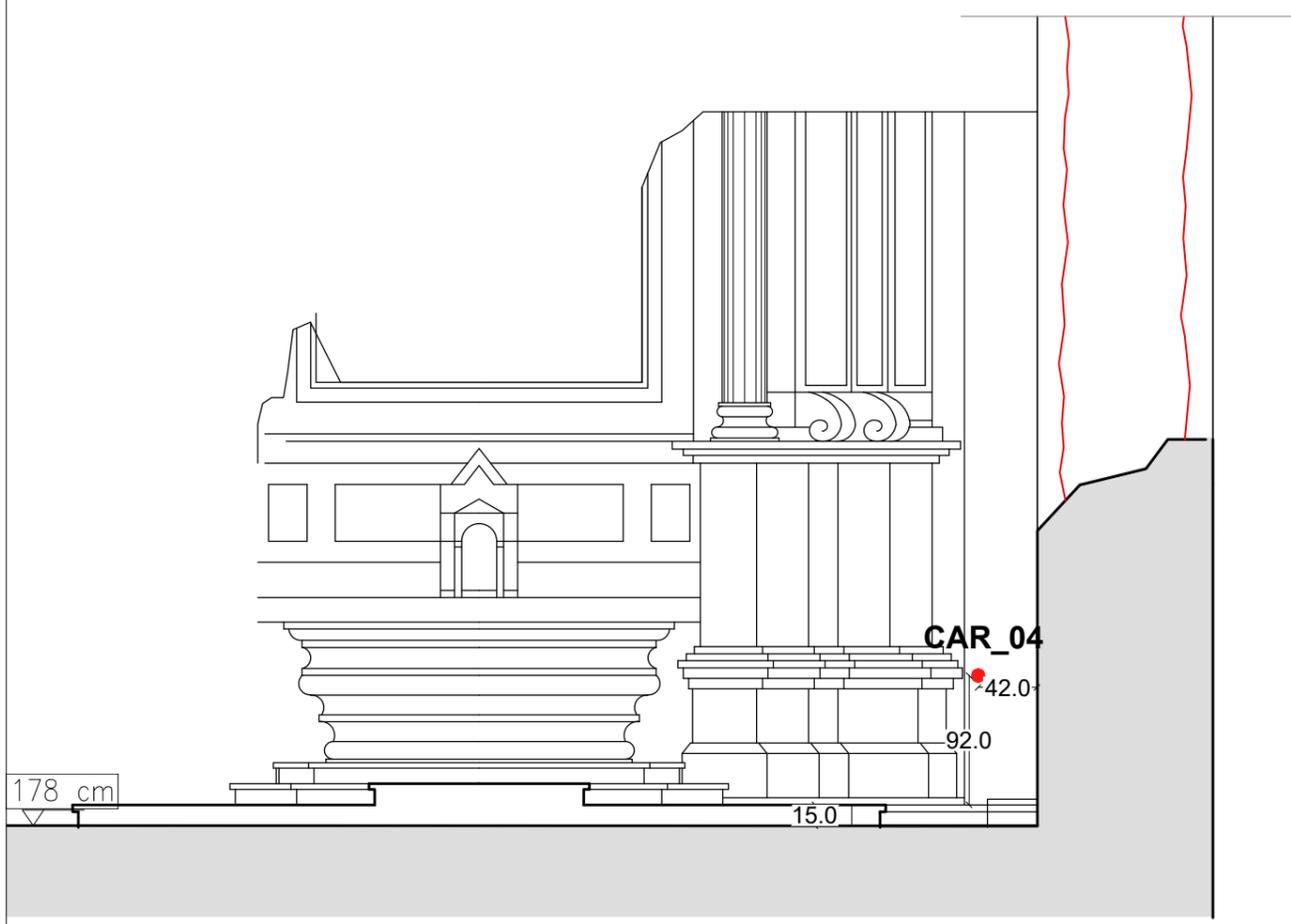




DETTAGLIO TRANSETTO ESTERNO
Scala 1:50

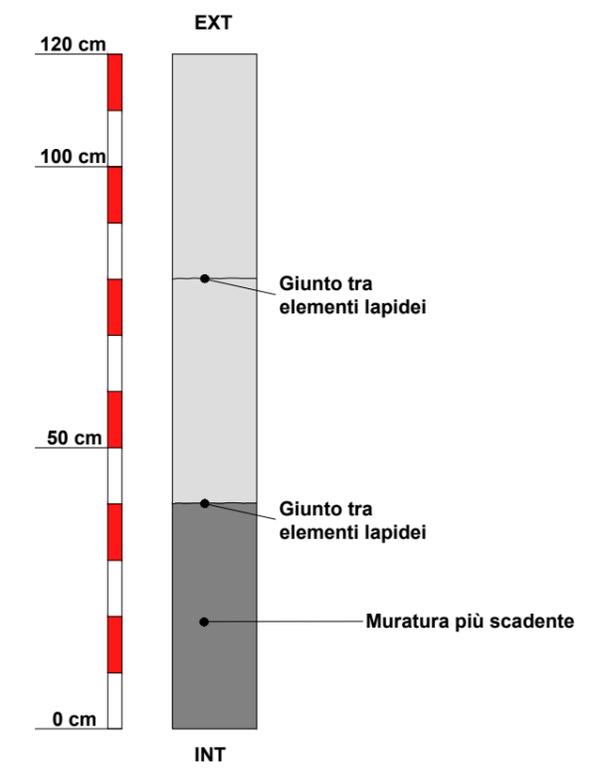
CAR_01



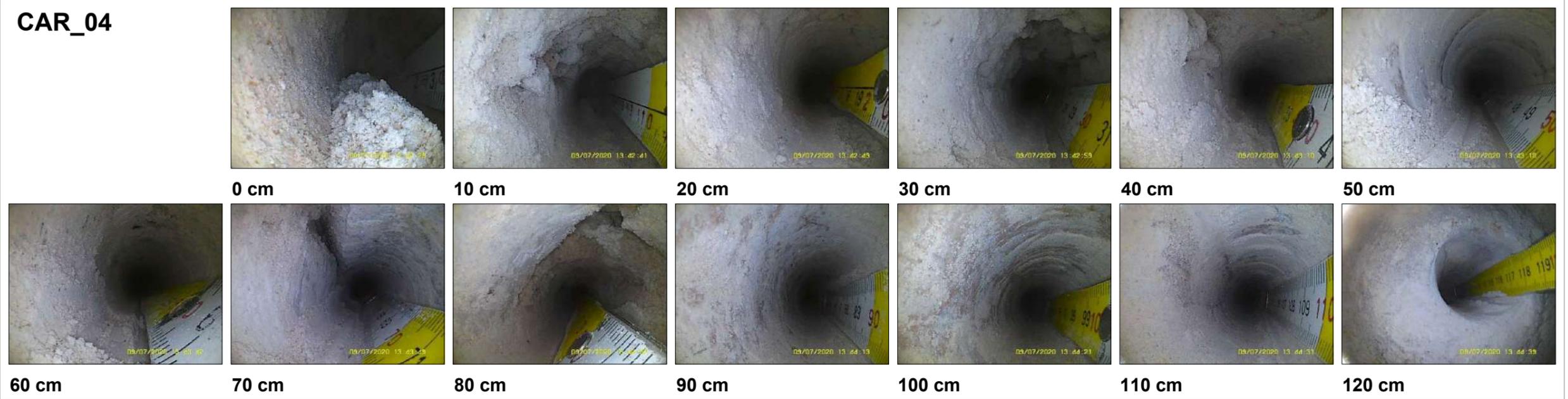


DETTAGLIO TRANSETTO INTERNO
Scala 1:50

CAR_04



CAR_04



0 cm

10 cm

20 cm

30 cm

40 cm

50 cm

60 cm

70 cm

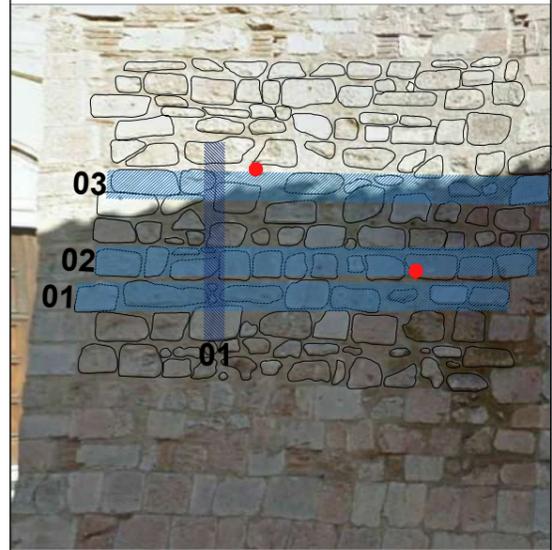
80 cm

90 cm

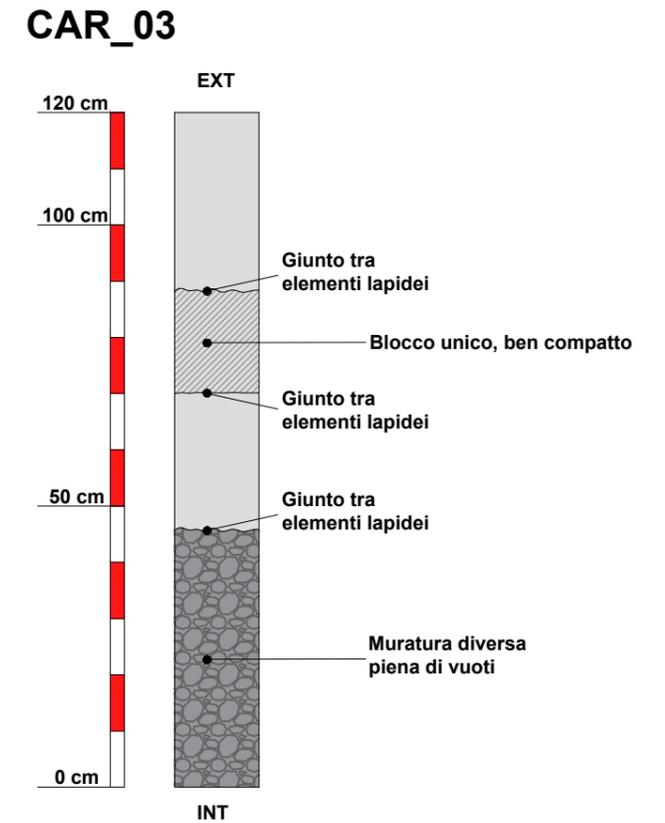
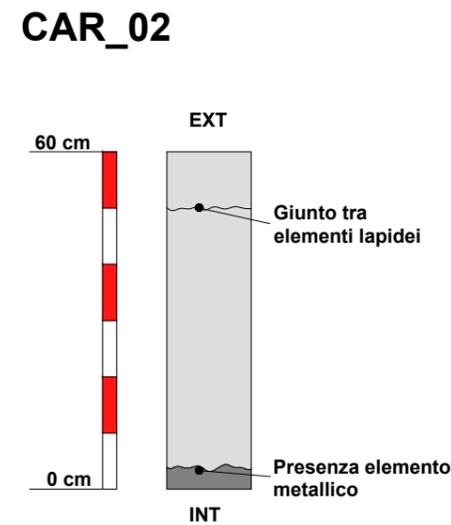
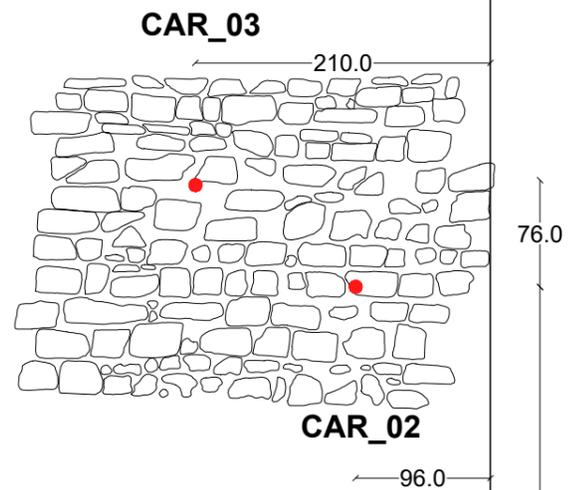
100 cm

110 cm

120 cm



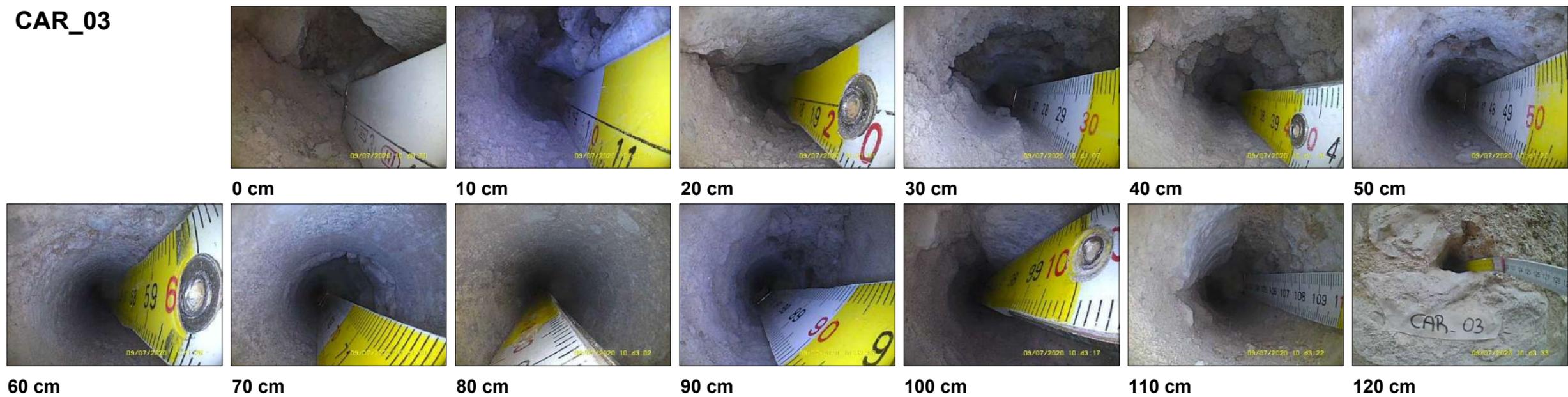
DETTAGLIO ABSIDE ESTERNO
Scala 1:50

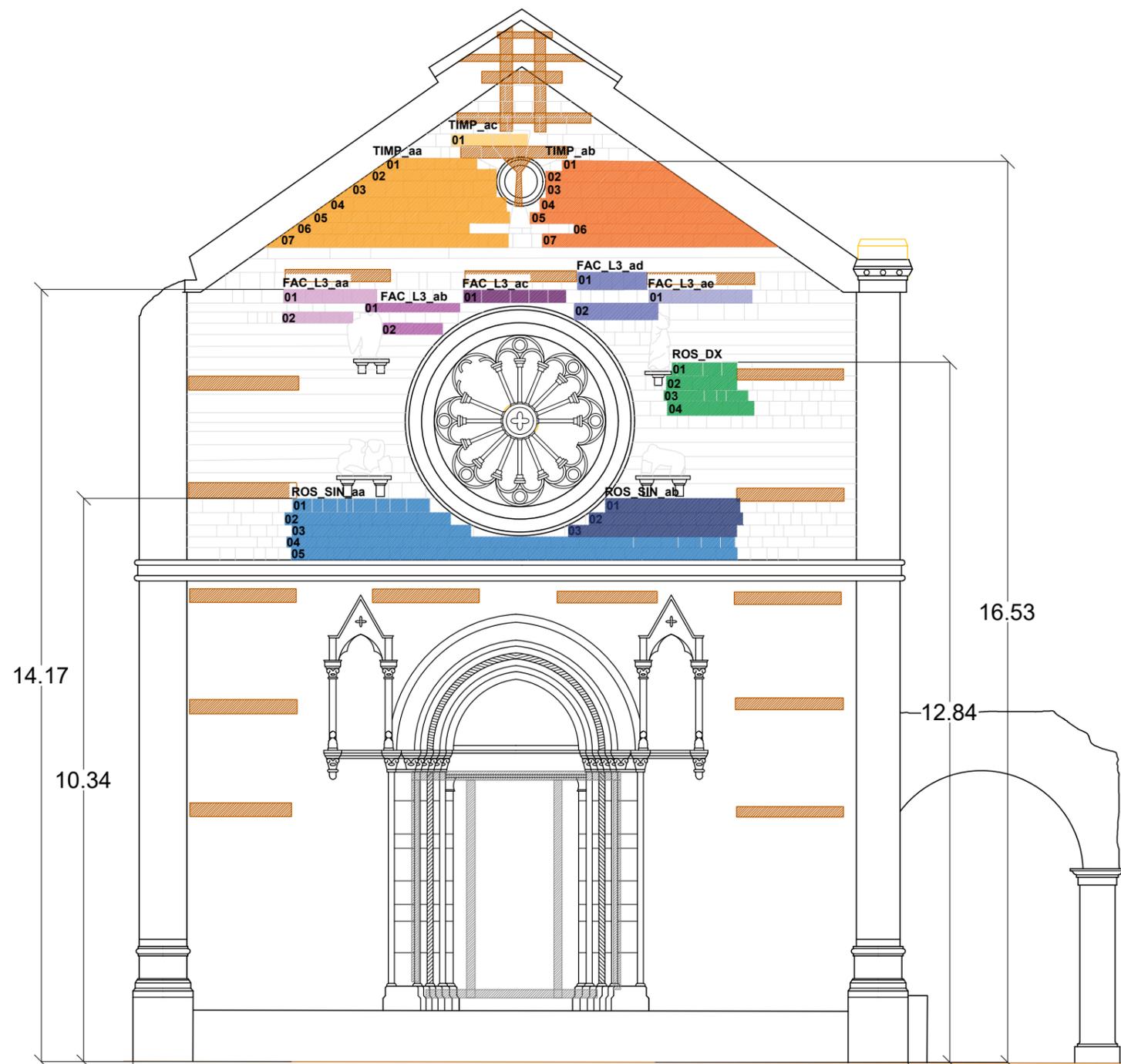


CAR_02

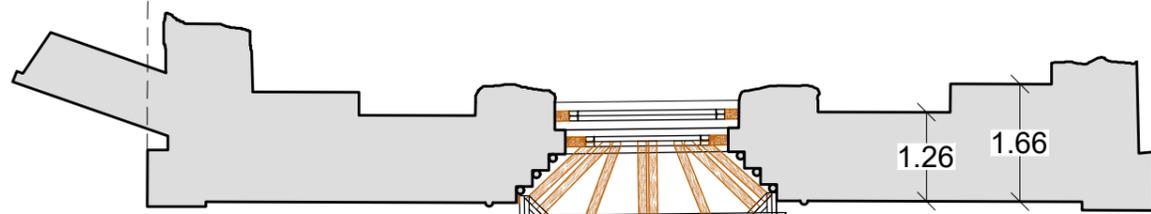


CAR_03

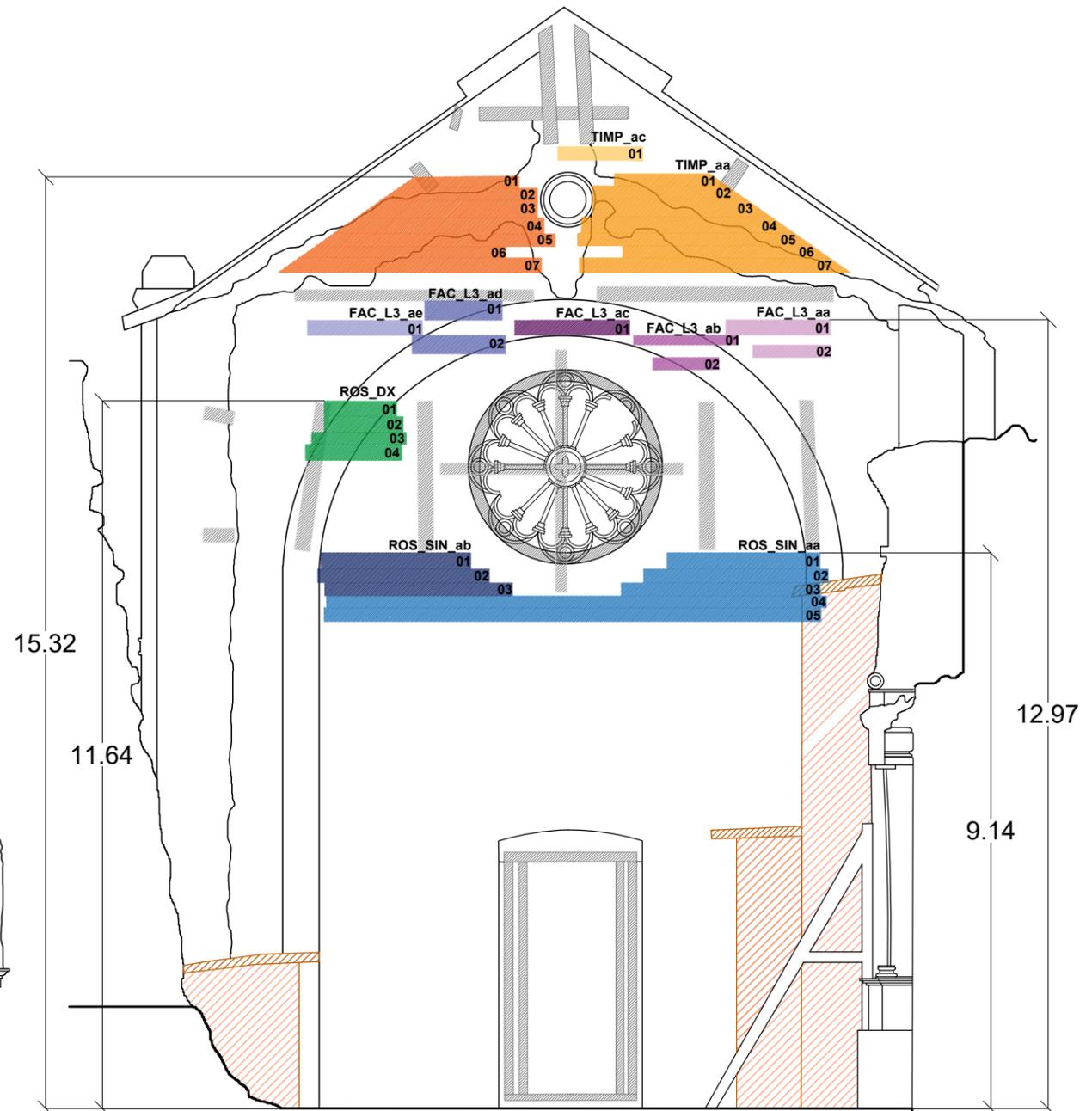




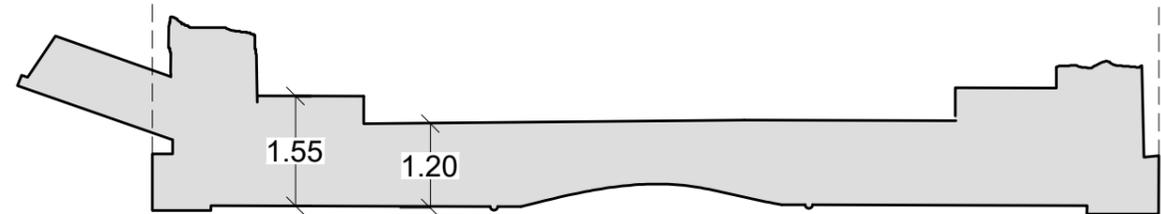
FACCIATA
SCALA 1:100



PIANTA QUOTA 1.20 m



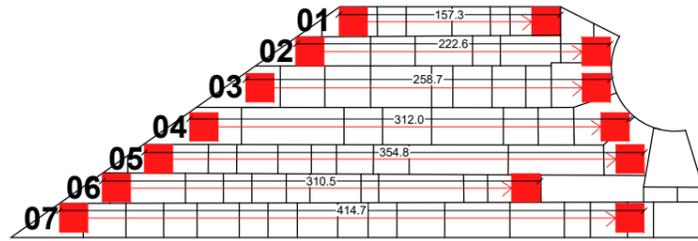
CONTROFACCIATA
SCALA 1:100



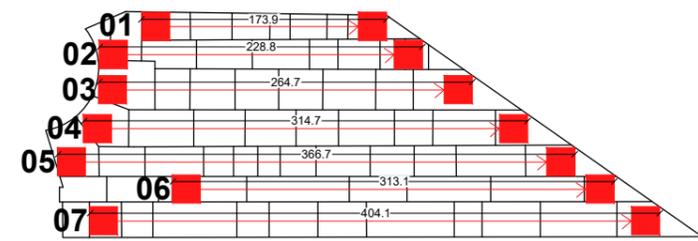
PIANTA QUOTA 10 m



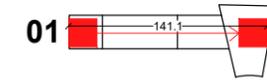
TIMP_aa



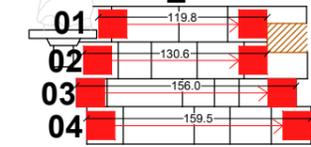
TIMP_ab



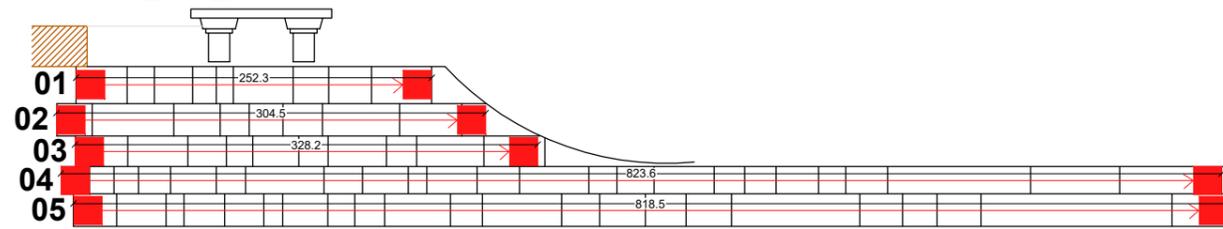
TIMP_ac



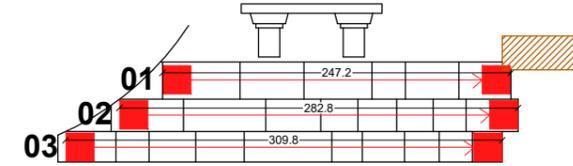
ROS_DX



ROS_SIN_aa



ROS_SIN_ab



ROS_SIN_aa - 01 Inizio Fine



ROS_SIN_aa - 02 Inizio Fine



ROS_SIN_aa - 03 Inizio Fine



ROS_SIN_aa - 04 Inizio Fine



ROS_SIN_aa - 05 Inizio Fine



ROS_SIN_ab - 01 Inizio Fine

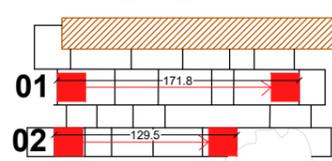


ROS_SIN_ab - 02 Inizio Fine

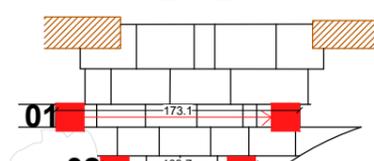


ROS_SIN_ab - 03 Inizio Fine

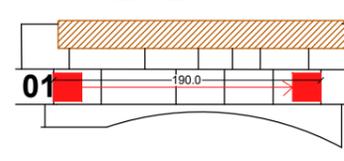
FAC_L3_aa



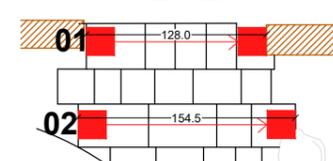
FAC_L3_ab



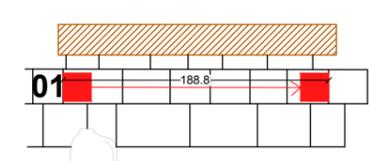
FAC_L3_ac



FAC_L3_ad



FAC_L3_ae



FAC_L3_aa - 01 Inizio Fine



FAC_L3_ab - 01 Inizio Fine



FAC_L3_ac - 01 Inizio Fine



FAC_L3_ad - 01 Inizio Fine



FAC_L3_ae - 01 Inizio Fine



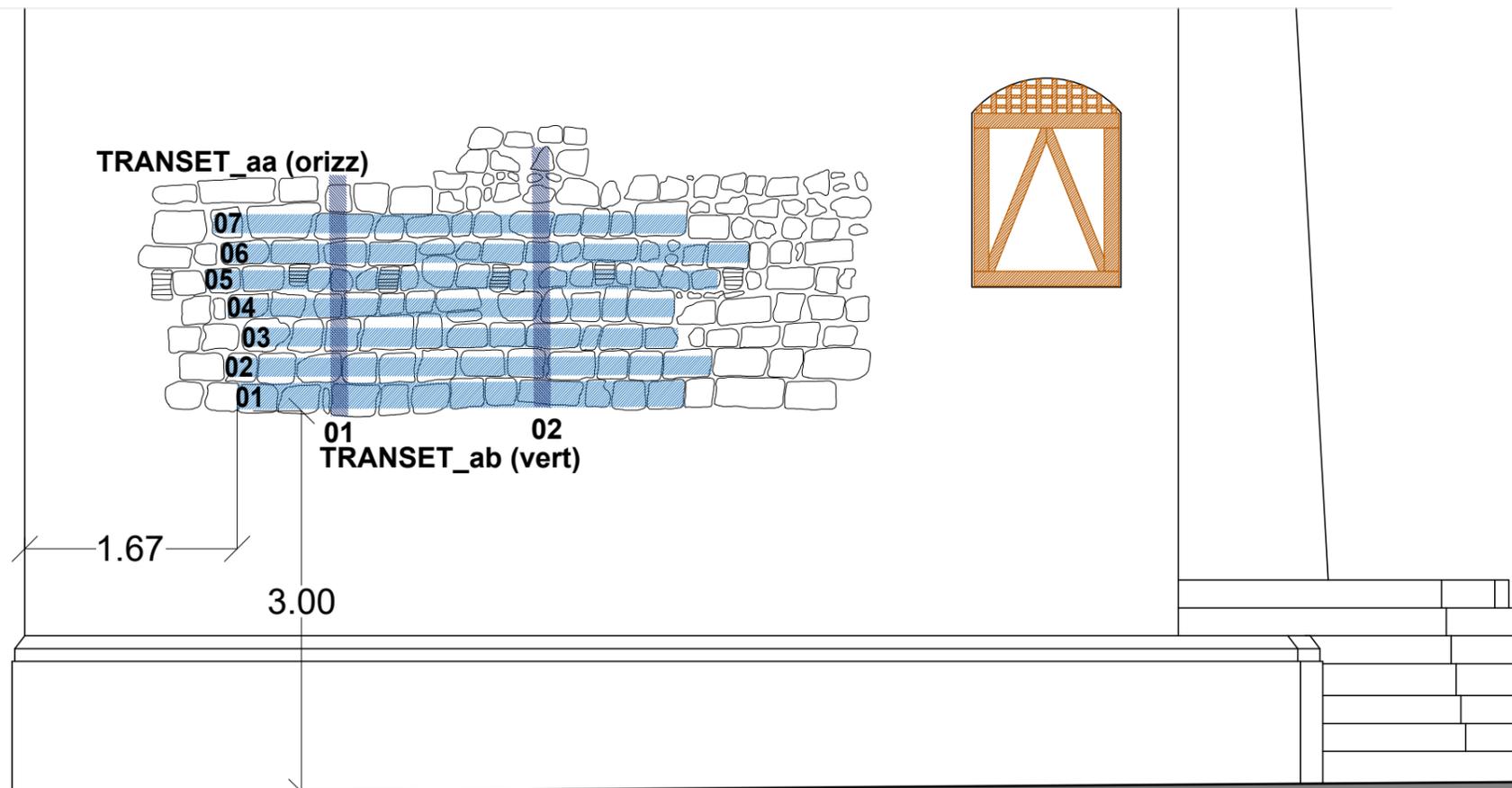
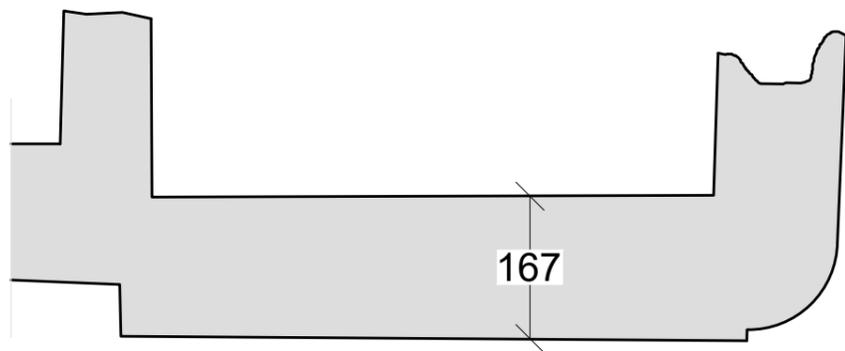
FAC_L3_aa - 02 Inizio Fine



FAC_L3_ab - 02 Inizio Fine

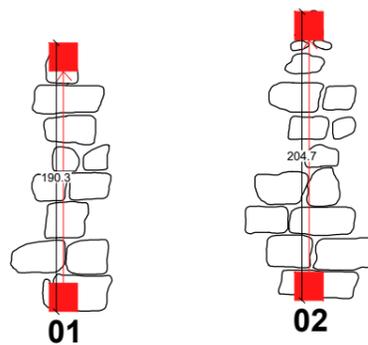


FAC_L3_ad - 02 Inizio Fine

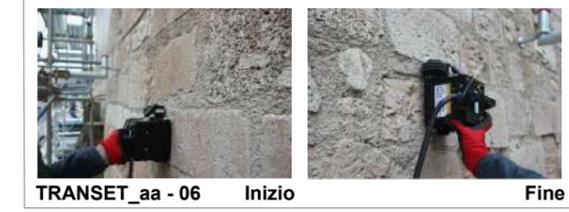
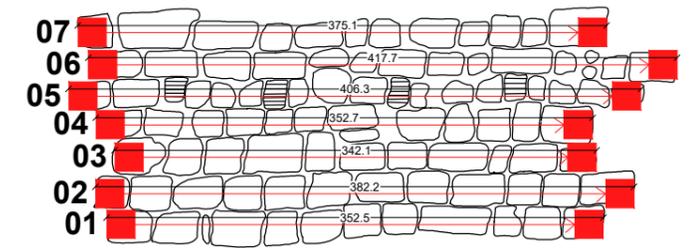


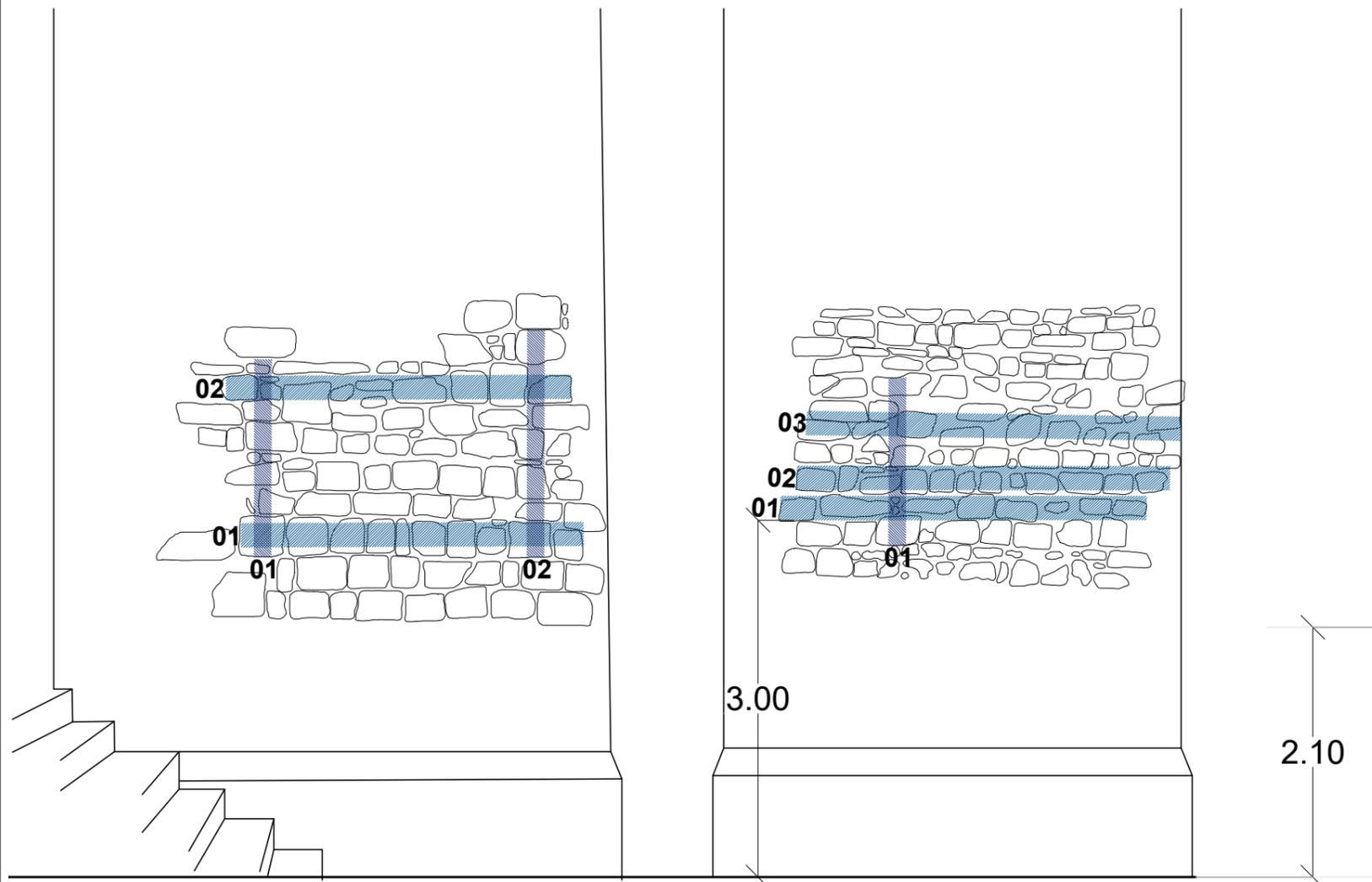
TRANSETTO
SCALA 1:50

TRANSET_ab (vert)

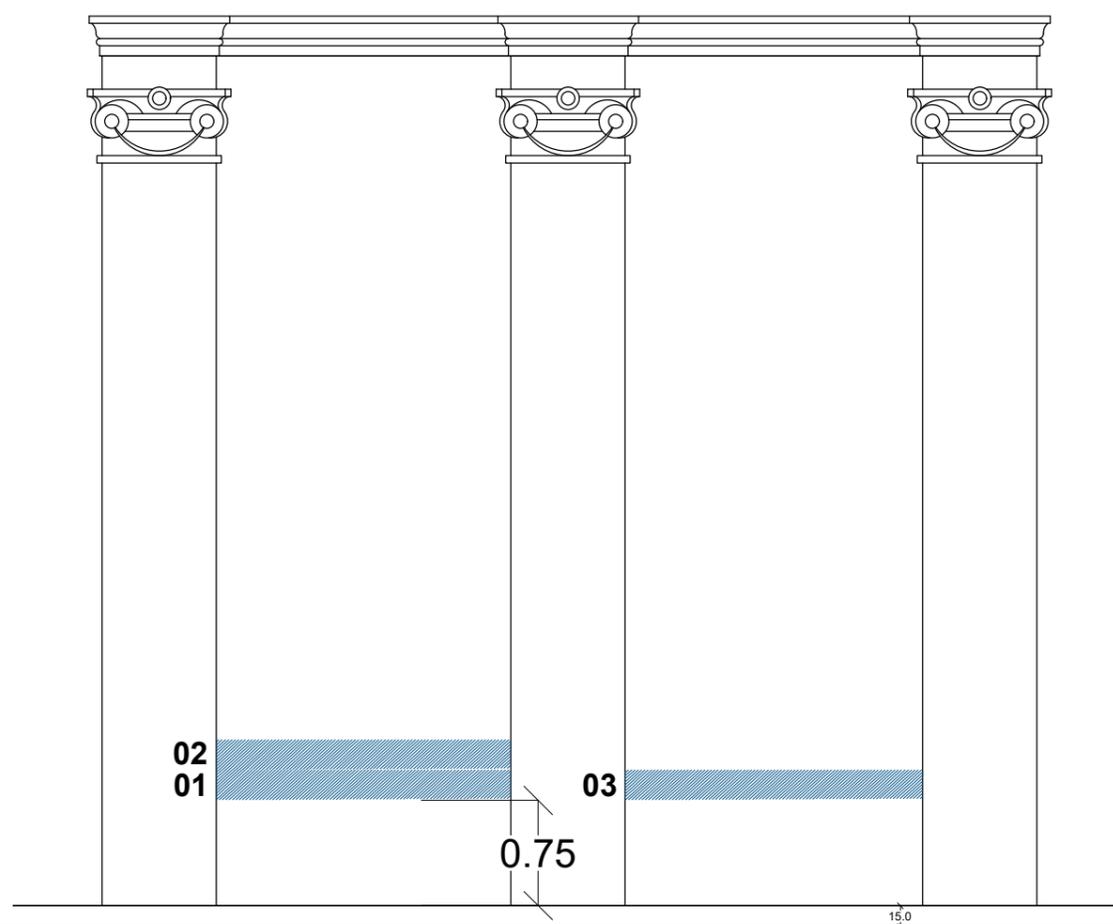


TRANSET_aa (orizz)

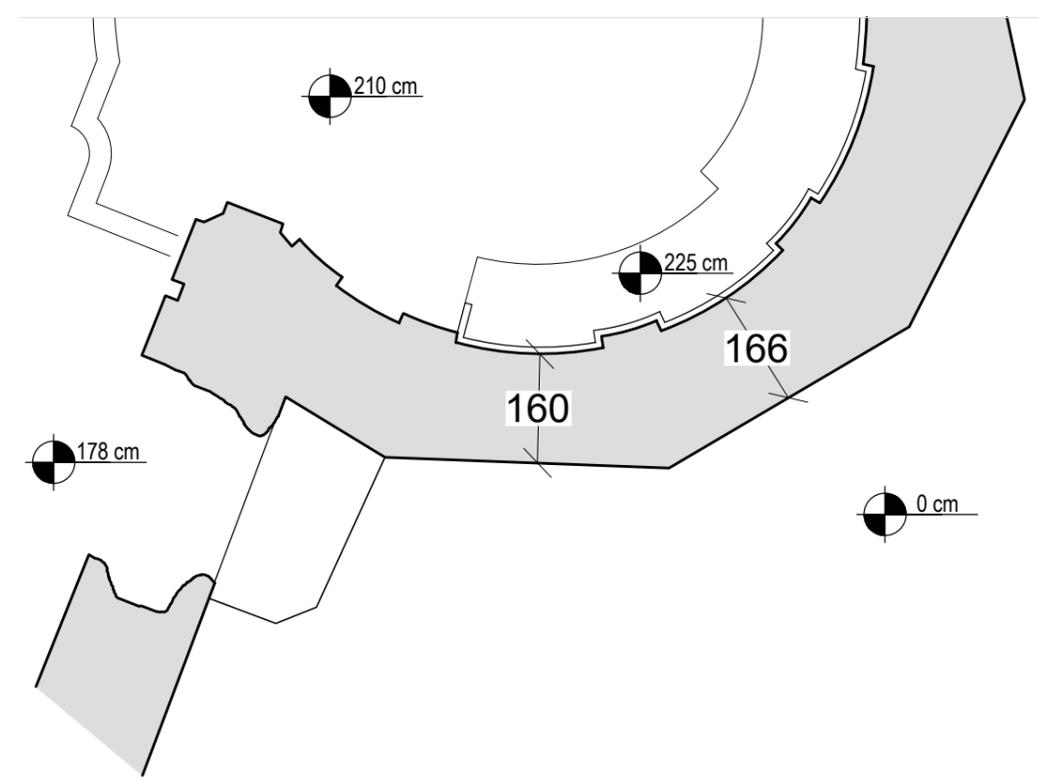




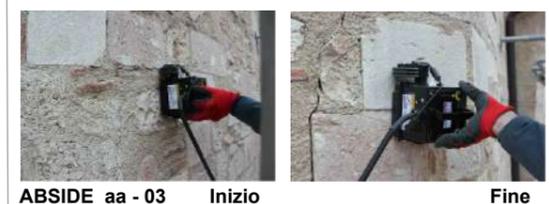
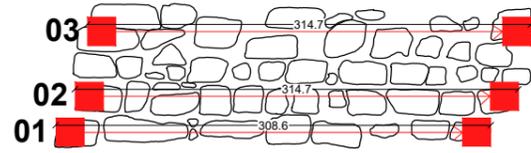
ABSIDE ESTERNO
SCALA 1:50



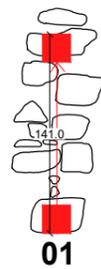
ABSIDE INTERNO
SCALA 1:50



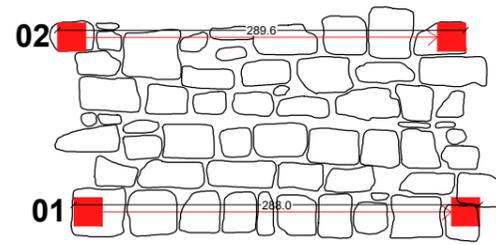
ABSIDE_aa (orizz)



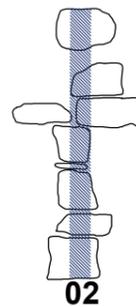
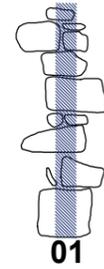
ABSIDE_ab (vert)



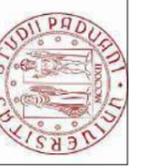
ABSIDE_ac (orizz)



ABSIDE_ad (vert)



ABS_INT_aa



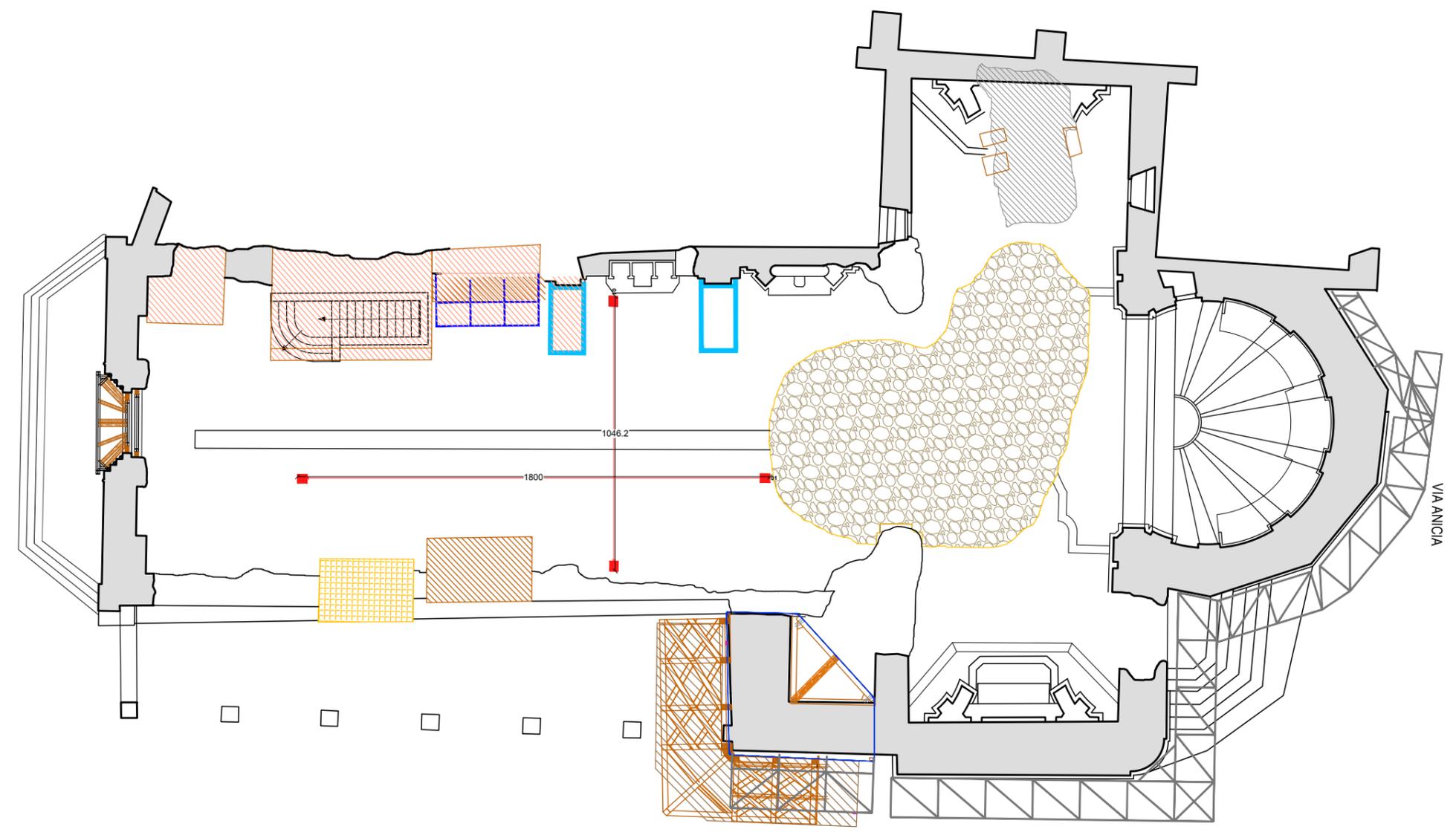
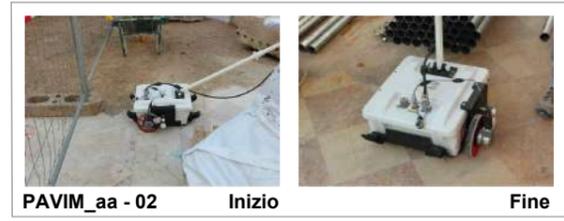
01

1046.2



1800.0

02



PIANTA PAVIMENTO
SCALA 1:200

VIA MAZZINI

VIA ANICIA

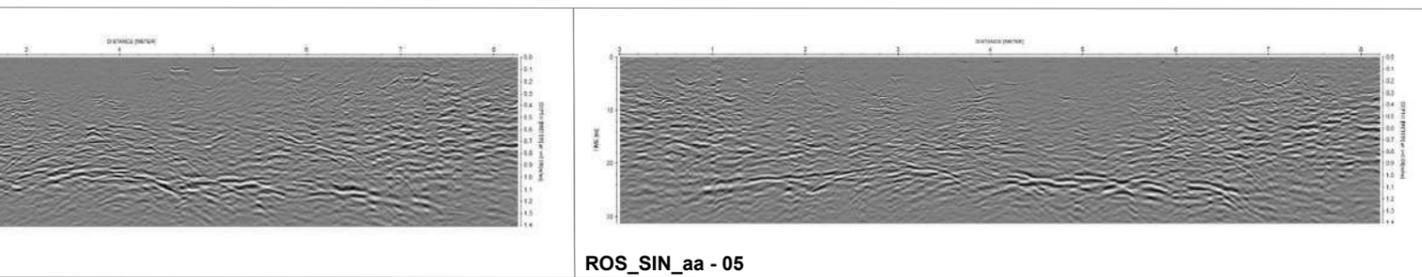
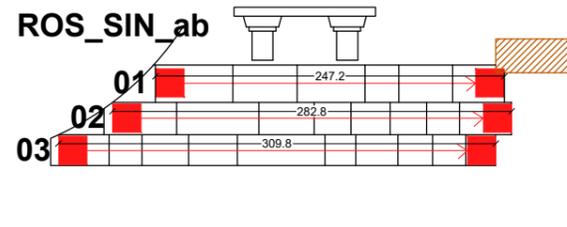
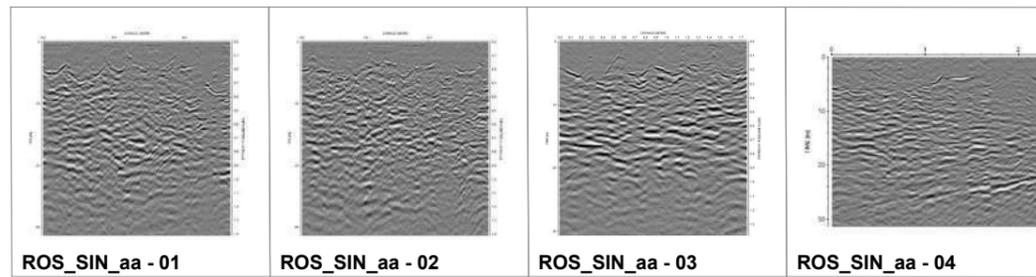
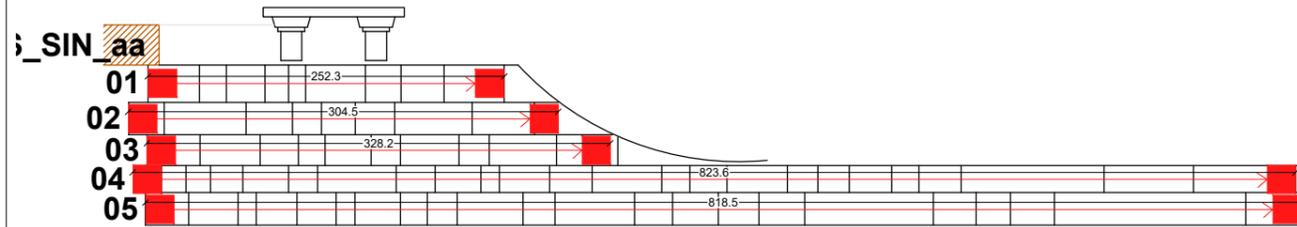
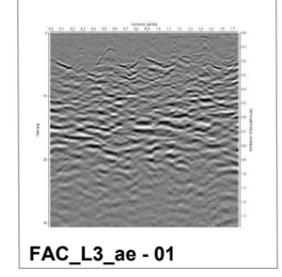
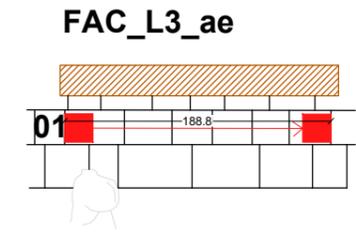
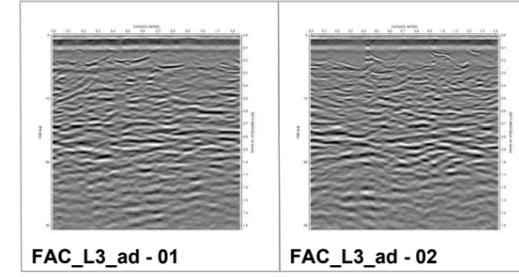
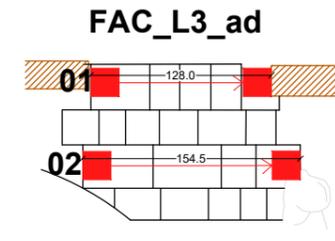
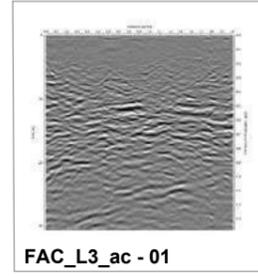
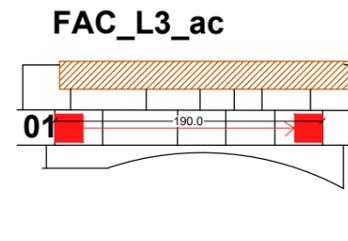
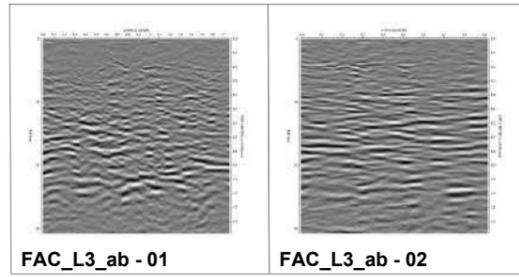
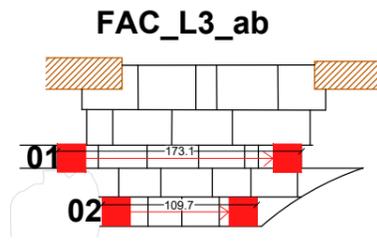
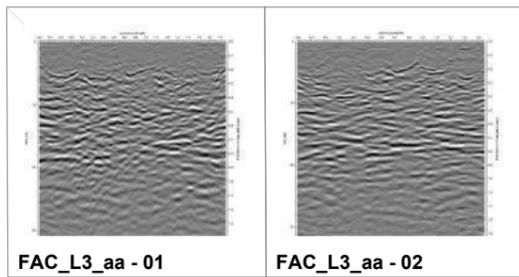
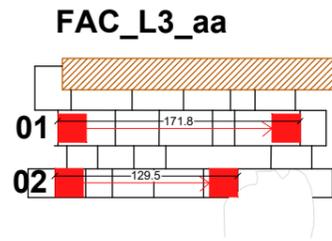
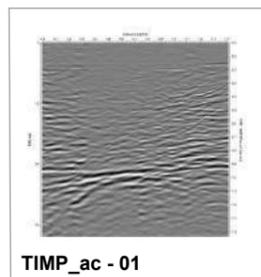
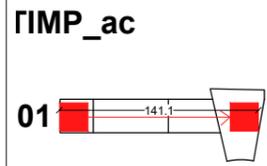
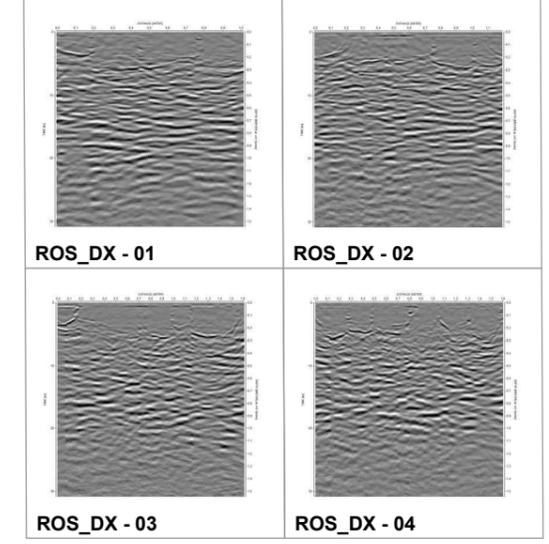
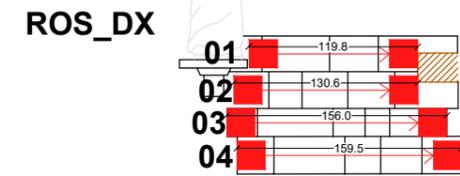
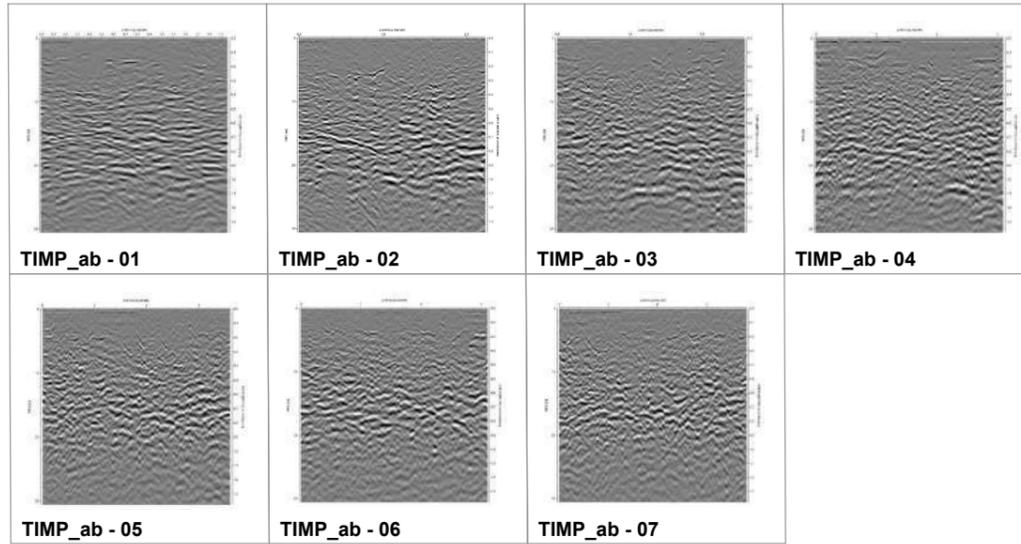
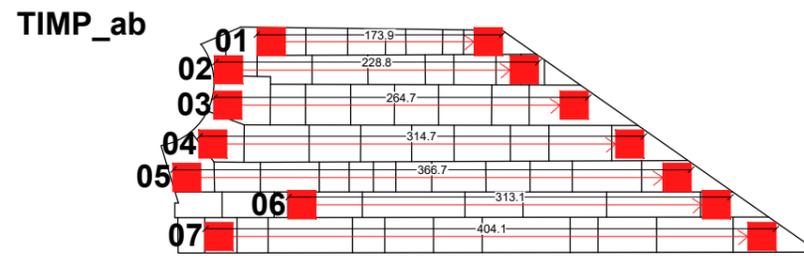
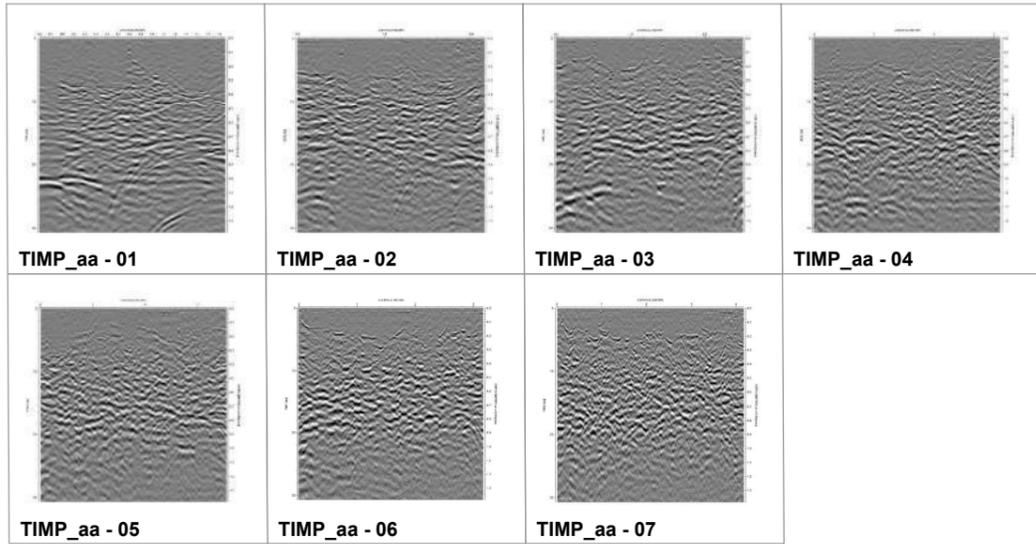
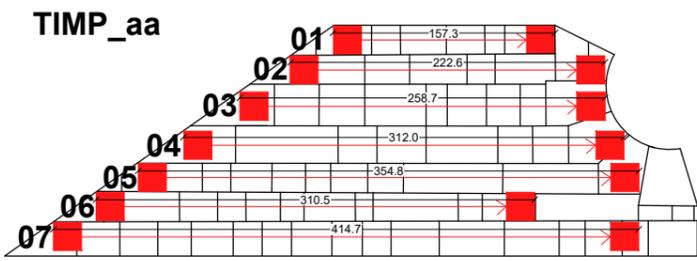
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



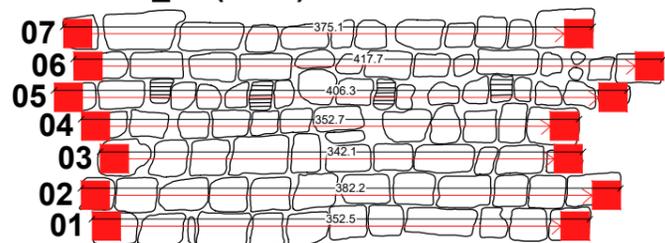
CONVENZIONE DI RICERCA INTERDIPARTIMENTALE
SULLA BASILICA DI SAN BENEDETTO A NORCIA TRA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA E UFFICIO
SORPRINTENDENTE SPECIALE MIBACT

Tesi di Laurea Magistrale - Ingegneria Edile - Architettura
Relatrice: Prof.ssa M.R. Valluzzi
Correlatori: E. Cescatti, M. Secco, C.Zanchetta
Laureanda: Pagan Kelly

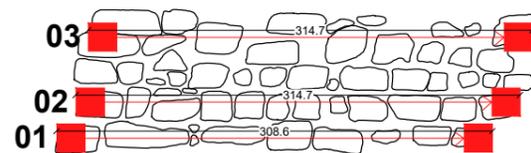
RISULTATI DELLE INDAGINI
GEORADAR
T17_ PIANTA PAVIMENTO



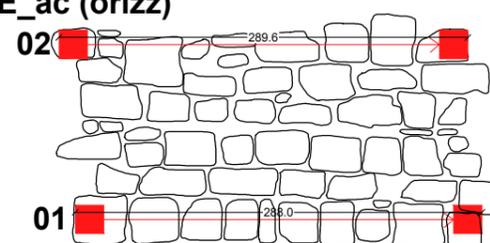
TRANSET_aa (orizz)



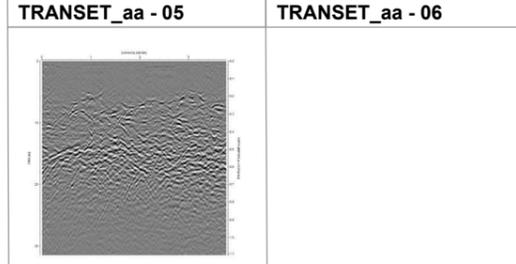
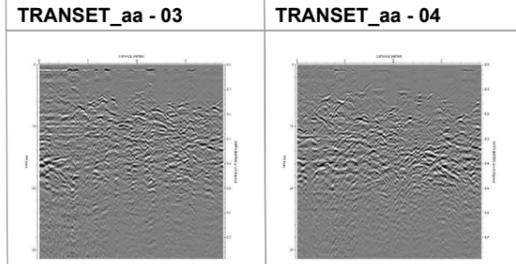
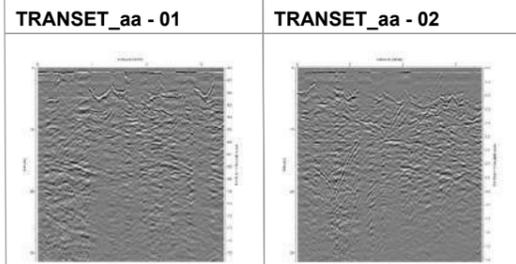
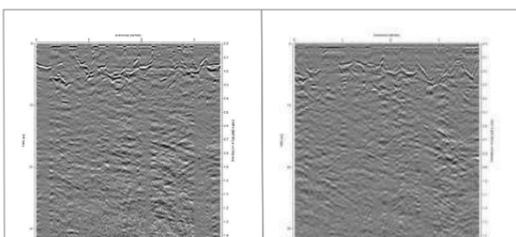
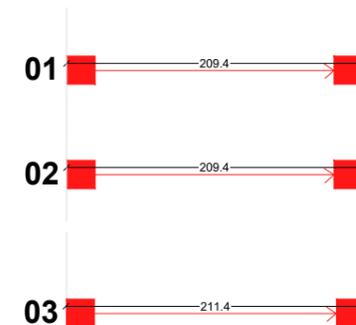
ABSIDE_aa (orizz)



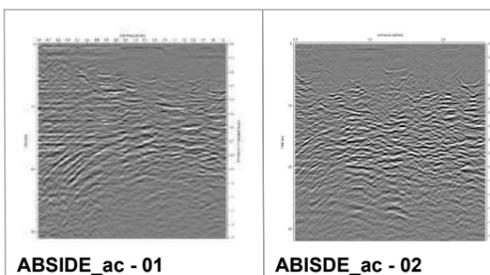
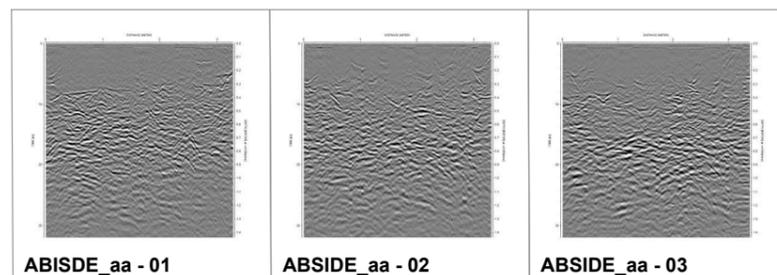
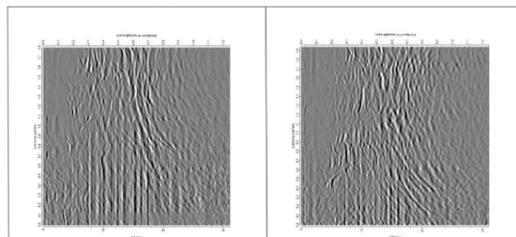
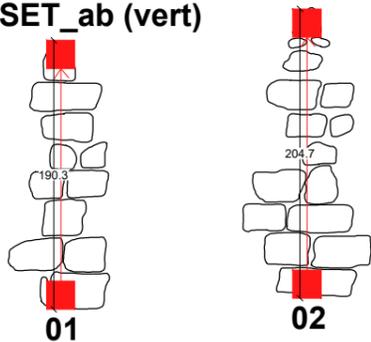
ABSIDE_ac (orizz)



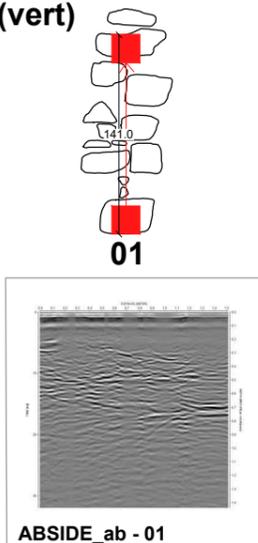
ABS_INT_aa



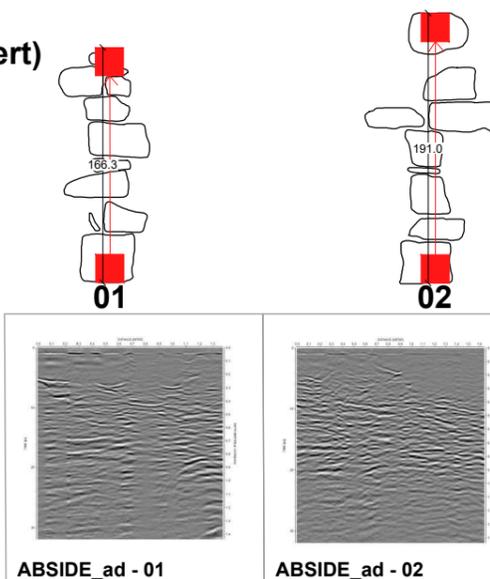
TRANSET_ab (vert)



ABSIDE_ab (vert)



ABSIDE_ad (vert)



PAVIM_aa

