



#### PROGETTO

## Riparazione dei danni e miglioramento sismico del Palazzo Ducale (da Varano), danneggiato dagli eventi sismici del 24 agosto 2016 e successivi

#### UBICAZIONE

Piazza Cavour - 62032 - Camerino (MC) - Marche - Italia

#### COMMITTENTE:

UNICAM Università degli Studi di Camerino

Piazza Cavour 19/f 62032 Camerino MC

P.I.: 00291660439

C.F.: 81001910439



#### Responsabile Unico del Procedimento:

Ing. Gian Luca Marucci

#### Coordinamento Progetto:

Prof. Ing. Graziano Leoni

#### Supporto al R.U.P. per:

##### Indagini strutturali:

Prof. Ing. Alessandro Zona  
Ing. Michele Morici  
Evolvea s.r.l. - Gruppo Filippetti

##### Indagini geologiche:

Geol. Marcello Maccari

##### Analisi storica:

Prof. Arch. Gaia Remiddi

##### Analisi conoscitiva delle componenti materico-costruttive:

Prof. Arch. Enrica Petrucci  
Dott. Graziella Roselli  
Arch. Diana Lapucci

##### Progettazione opere di restauro architettonico:

Prof. Arch. Enrica Petrucci

##### Progettazione opere strutturali:

Seitec Seismotechnologies srl  
Prof. Ing. Luigino Dezi  
Ing. Alessandro Balducci

##### Progettazione opere impiantistiche:

ANTAS S.p.a.

##### Coordinamento della sicurezza in fase di progettazione:

Arch. Guido Martini

##### Collaboratori:

Ing. Lucia Barchetta  
Ing. Leonardo Cipriani  
Arch. Noemi Lapucci  
Ing. Claudia Canuti  
Geomore s.r.l.

#### TITOLO

## Progetto Esecutivo Relazione Tecnica

#### DISCIPLINA

### STRUTTURE

ELABORATO:  
**D** 0 0 1

REVISIONE	DATA:	OGGETTO:	REDATTO:	VERIFICATO:	APPROVATO:	SCALA:
rev_00	05/09/2022	EMISSIONE DEL PROGETTO	AG	AB	LD	
rev_01	27/02/2023	EMISSIONE PER VERIFICA DEL PROGETTO ESECUTIVO	AG	AB	LD	
rev_02	01/03/2024	EMISSIONE PER ESAME DEL GRUPPO DI LAVORO	AG	AB	LD	
rev_03	__/__/__					NOME FILE:
rev_04	__/__/__					D-001_Relazione Tecnica

## INDICE

1 Premessa .....	2
2 Analisi del quadro fessurativo.....	6
2.1 Corpo A (Quadriportico).....	6
2.2 Corpo B.....	20
2.3 Corpo C.....	25
3 Piano di indagini.....	44
3.1 Campagna di indagine .....	45
3.2 Prove endoscopiche e saggi localizzati.....	45
3.2.1 Pareti.....	47
3.2.2 Solai Corpo A.....	51
3.2.3 Solai Corpo B.....	57
3.2.4 Solai Corpo C.....	61
3.3 Martinetti piatti doppi.....	63
3.4 Caratterizzazione meccanica delle arenarie delle colonne del Quadriportico .....	66
3.5 Indagini radiografiche sulle colonne del Quadriportico.....	68
3.6 Valutazione delle caratteristiche dinamiche e del tiro delle catene del Quadriportico .....	71
3.7 Valutazioni sull'integrità della struttura muraria .....	73
3.8 Valutazione delle caratteristiche dei terreni.....	74
4 Interventi di ripristino e miglioramento sismico .....	77
4.1 Interventi sul Corpo A (Quadriportico) .....	78
4.1.1 Interventi di miglioramento del percorso delle azioni orizzontali .....	83
4.1.2 Interventi di ricostruzione della copertura .....	87
4.1.3 Interventi di rinforzo delle pareti perimetrali al piano Strada .....	90
4.1.4 Interventi di ripristino.....	91
4.1.5 Interventi sulle colonne .....	92
4.2 Interventi sui Corpi B e C.....	94

## RELAZIONE TECNICA

### 1 Premessa

La presente relazione è relativa ai lavori di riparazione dei danni e miglioramento sismico del complesso edilizio del Palazzo Ducale Da Varano, sito in via Del Bastione, 1, nel Comune di Camerino.



Figura 1.1 - Vista aerea del fabbricato

Il fabbricato si compone di più aggregati di forma pressoché rettangolare ed interconnessi tra loro, secondo la disposizione indicata in Figura 1.2. Si possono riconoscere i seguenti 5 corpi:

1. “Case vecchie” del 1250, oggi contenente l’Aula degli Stemmetti;
2. La torre e la parte di muro contiguo, appartenenti alla prima cinta di mura camerinese;
3. Il palazzo di Venanzio della prima metà del 1300;
4. Il “Palazzo novo” di Giulio Cesare (Quadriportico) della seconda metà del 1400;

5. Le “Logge” con la scala a chiocciola e gli speroni che reggono il cortile, risalenti al 1527.

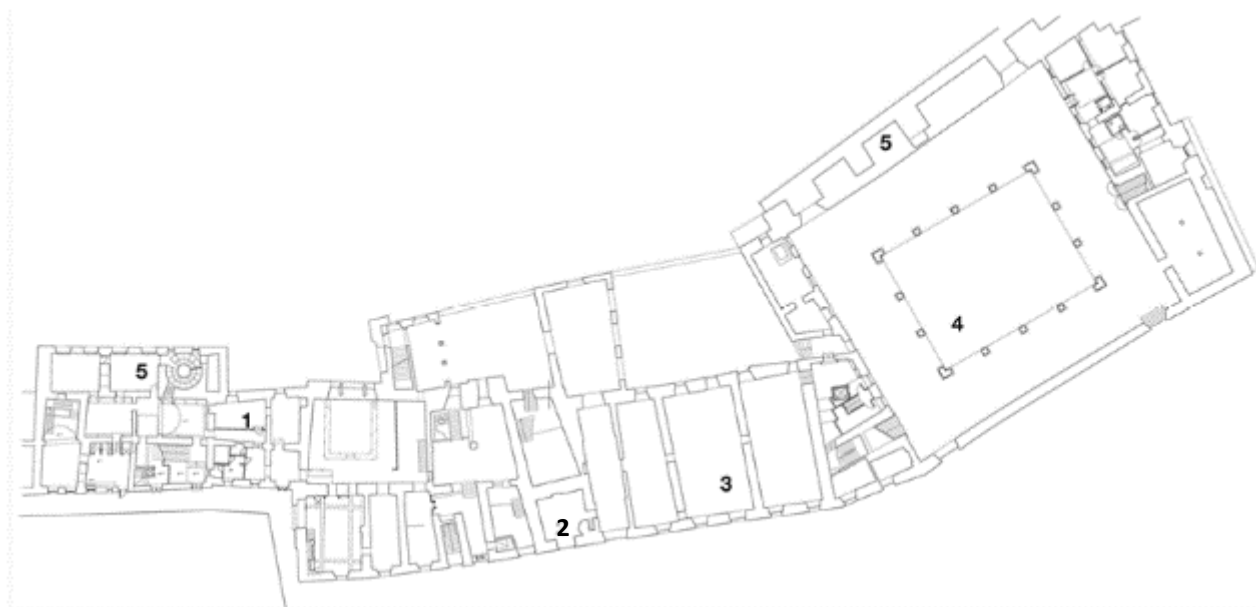


Figura 1.2 – Aggregati che formano il fabbricato

Nel seguito si riportano sinteticamente le principali fasi costruttive del Palazzo.

### **I fase costruttiva 1220 – 1263**

La prima fase costruttiva è legata alla famiglia dei Da Varano che si stanziò nella città di Camerino nel 1252. Il primo blocco del Palazzo è costituito dall'attuale parte nord-est, compresa una torre che era collegata alla vicina cattedrale tramite un ponte.

Nel 1263 Gentile I Da Varano inizia la prima fase di costruzione del Palazzo.


### **II fase costruttiva 1375 – 1444**

Nel 1375 inizia la seconda fase di costruzione del palazzo da parte di Venanzio Da Varano. Nel 1444 Giulio Cesare Da Varano viene acclamato Signore di Camerino e inizia i lavori di accorpamento dei blocchi realizzati in precedenza.

### **III fase costruttiva 1489 - 1525**

Nel 1489 inizia la terza fase di costruzione del con l'Architetto Baccio Pontelli che era in quel periodo nelle Marche per dedicarsi ad importanti commissioni.



	UNIVERSITA' DI CAMERINO	LAVORI DI RIPARAZIONE E MIGLIORAMENTO SIMICO DEL PALAZZO DUCALE DI CAMERINO	RELAZIONE TECNICA
--	----------------------------	--	-------------------

Nel 1492 viene terminata la costruzione del cortile e nel 1497, secondo alcuni storici, i lavori del palazzo erano conclusi.

Nel 1502 Camerino viene occupata dai Borgia e diventa Ducato e nel 1525 viene annessa allo Stato Pontificio.

#### **IV fase costruttiva 1568 - 1799**

Nel 1568 viene scoperta per intero la facciata del Palazzo verso la piazza demolendo le case di guardia. Nel 1569 al di sotto del Palazzo del Governatore vengono trasferite le carceri rimanendovi fino all'800.

Nel 1571 viene eseguito il primo restauro al palazzo, con la realizzazione di cinque contrafforti.

Nel 1728 è eseguito il restauro radicale del palazzo per ospitare l'Università pontificia di Camerino istituita da Benedetto XIII e nel 1740 la biblioteca Valentiniana trova sede nelle stanze che si affacciano sul cortile.

Nel 1799 un forte terremoto sconvolge la città, con minaccia di crollo del muro di facciata verso la Piazza, danni al muro sopra la cancelleria, danni rilevanti alla copertura e al muro verso le stanze di Governo, vari crolli di soffitti, murature e volte interne.

#### **Interventi di Restauro**

##### **1760 - 1850**

Importanti lavori di restauro e consolidamento del Palazzo Ducale furono realizzati nel 1760 dall'architetto Marchionni, con la messa in opera di catene nei sotterranei, la costruzione dello sperone su vicolo della Salara e la formazione di pilastri e sott'archi nel cortile maggiore.

Nel 1824 furono eseguiti i lavori di rifacimento del selciato di tutto il loggiato e nel 1850 i lavori sulla facciata esterna, con introduzione del balconcino al di sopra del Portale di ingresso, di un finto bugnato ad intonaco e di cornici di intonaco.

##### **1928 - 1968**

Nel 1928 la Regia Sovrintendenza delle Marche propone il parziale ripristino del quadriportico, con un progetto dell'architetto Bizzarri e sotto la supervisione dell'allora Soprintendente Serra.

Nel 1950 l'Università acquisisce e modifica alcuni ambienti nel Palazzo, con nuove aule ai lati del corridoio centrale, sopraelevazione di due soffitte con murature in mattoni forati per avere due grandi aule. Ciò comporta un radicale consolidamento statico, con rifacimenti murari a partire da terra e pesanti travature in c.a..

Nel 1957 viene redatto un Progetto di Risanamento, concentrato sui corpi prospettanti il Cortile che presentano problemi strutturali preoccupanti, dovuti ad eventi sismici, geologici e bellici.

Nel 1968 sono riaperte le finestre originali del Cortile precedentemente chiuse, con consolidamento delle riquadrature e ricalatura dei graffiti sulla parete tra le finestre.

### 1973- 1980

Nel periodo 1973-76 sono restaurati i prospetti della corte, con opere di impermeabilizzazione e consolidamento murario anche armato delle strutture verticali e orizzontali, di sottofondazione con l'utilizzo di micropali, di riprese di murature e di tiranti e con interventi di consolidamento mediante inserimento di barre di armatura nelle colonne e nelle arcate in pietra, consentendo la rimozione dei contrarchi in muratura sui lati nord-ovest e sud-ovest del portico.

Nel periodo 1977-78 si eseguono lavori di consolidamento e ricostruzione delle volte a crociera, sul lato sud-est, già ricostruite in canna e gesso a seguito del crollo del 1799.

Nel 1979 avviene il restauro della fascia muraria e delle finestre cruciformi soprastanti il loggiato e il rifacimento delle pavimentazioni esterne e del sottoportico.

La facciata prospiciente la piazza, modificata nella seconda metà dell'800 con l'introduzione di un balconcino al di sopra del portale, di un finto bugnato, ad intonaco e di cornici di stucco, viene riportata a vista nel 1980.

I lavori eseguiti nella seconda metà del XIX secolo hanno in sostanza trasformato i prospetti della corte con la rimozione dei contrarchi ed hanno previsto importanti interventi di consolidamento con barre di armatura nelle colonne, negli archi e nelle pareti.

Con i lavori eseguiti dopo il sisma del 1997 sono state infine apportate importanti modifiche interne con sostanziali interventi anche di natura strutturale su pareti, corpi scala, capriate ed architravi, che a seguito delle scosse sismiche del 2016 sono risultati interessati da quadri fessurativi piuttosto significativi e talvolta da crolli locali.

## 2 Analisi del quadro fessurativo

Per l'interpretazione del quadro fessurativo, il fabbricato è stato idealmente diviso in 3 differenti corpi: il corpo A è rappresentato dal Quadriportico, dove l'interpretazione del quadro fessurativo è legata anche alla complessità della sua composizione strutturale; il corpo B rappresentato dal Corridoio della Facoltà di Giurisprudenza, che ha subito i danni minori in seguito al sisma; ed infine il corpo C, rappresentato storicamente dall'affiancamento di diversi aggregati edilizi, e che presenta perciò differenti tipologie murarie, non adeguatamente collegate tra loro e di scarsa qualità.

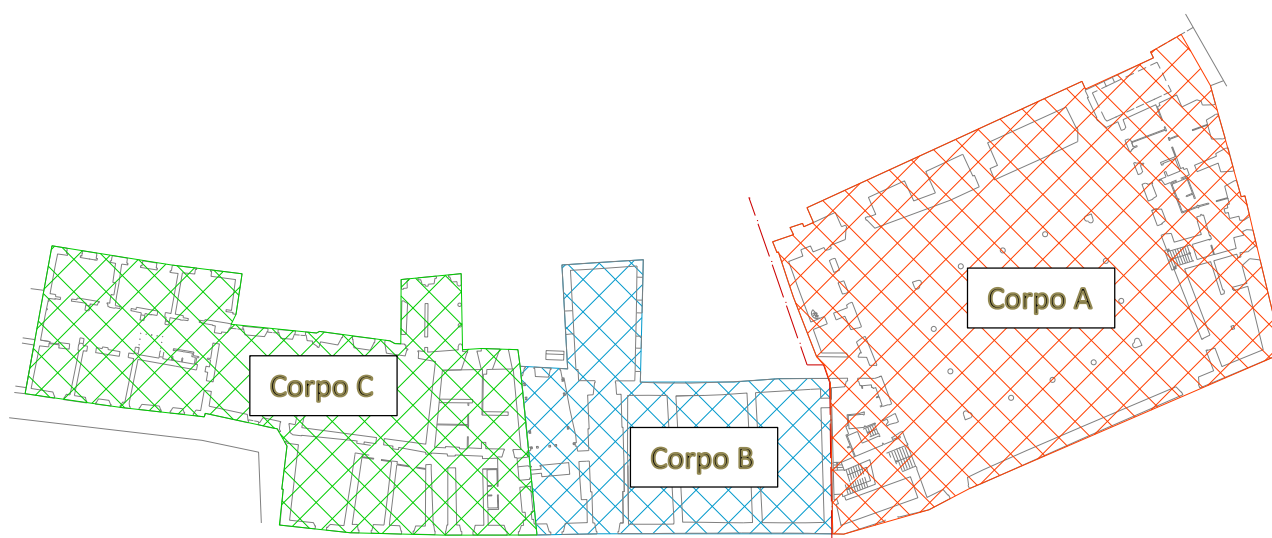


Figura 2.1 - Suddivisione del fabbricato per l'interpretazione del quadro fessurativo

### 2.1 Corpo A (Quadriportico)

Il quadro fessurativo del Quadriportico è conseguenza sia della mancanza di un adeguato meccanismo resistente in grado di trasferire le azioni sismiche orizzontali alle quattro pareti perimetrali del Quadriportico al Piano Strada, sia alle carenze tipiche dei fabbricati in muratura, come i danneggiamenti dei setti murari al piano Strada sui lati nord e sud, indeboliti dalla presenza di numerose aperture, e quelli legati alla mancanza di ammorsamenti tra pareti ortogonali, alla scarsa qualità della tessitura muraria.

Nel seguito si riporta una descrizione sintetica del quadro fessurativo.

La prima tipologia di danno è causata, come detto, dalla mancanza di un meccanismo efficiente di trasmissione delle azioni sismiche inerziali legate alle masse del piano Nobile e della copertura (solai, controsoffitti e pareti di elevazione) alle pareti perimetrali del Quadriportico. Una parte significativa delle azioni orizzontali dovute al sisma, infatti, in mancanza di muri di spina al piano Nobile e di orizzontamenti sufficientemente rigidi nel proprio piano, hanno impegnato le pareti perimetrali del piano Nobile nel loro comportamento a piastra, producendo fessurazioni orizzontali molto importanti sulle pareti lato Piazza e lato Orto Botanico e il crollo della porzione di parete al di sopra dell'ingresso principale.

In Figura 2.2 sono evidenziate le quattro pareti perimetrali del Quadriportico che devono far fronte al trasferimento delle azioni sismiche orizzontali al piano Strada. Le colonne non hanno infatti sufficiente rigidezza per offrire un contributo resistente alle azioni orizzontali.

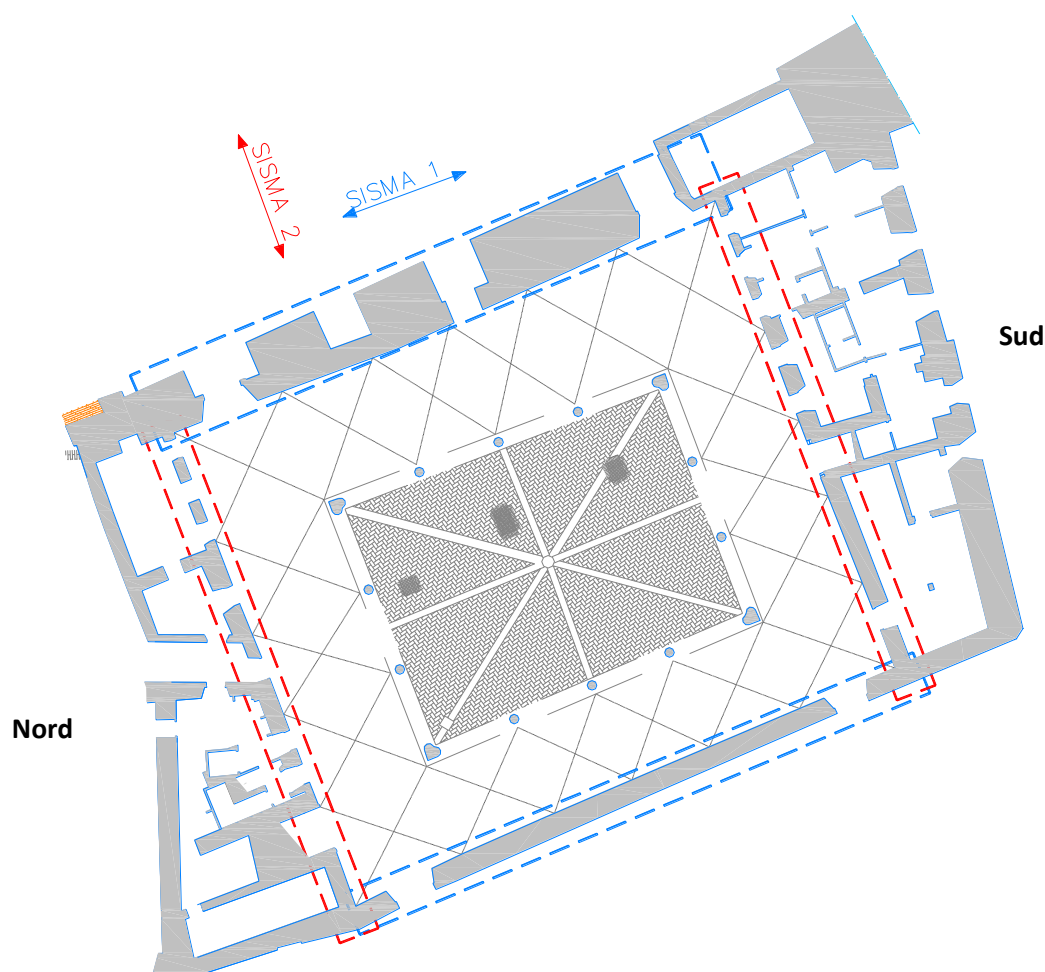


Figura 2.2 - Pannelli murari del Quadriportico al piano Strada resistenti al sima nelle due direzioni 1 e 2

Le fessurazioni più significative prodotte dal sisma possono essere così suddivise:

- Fessurazione a taglio dei maschi murari costituenti le pareti parallele all'azione sismica al piano Strada: le pareti trasversali sui lati nord e sud interessate da un elevato numero di aperture e le pareti interne del piano Nobile, sono risultate fortemente fessurate, con formazione di lesioni diagonali o a X (Figura 2.3). In Figura 2.4 è riportata la pianta del piano Strada, dove sono evidenziate le due pareti che hanno subito i danni maggiori a causa della presenza di un elevato numero di aperture.



Figura 2.3 - Fessurazione a X di un maschio murario nella zona tra due aperture

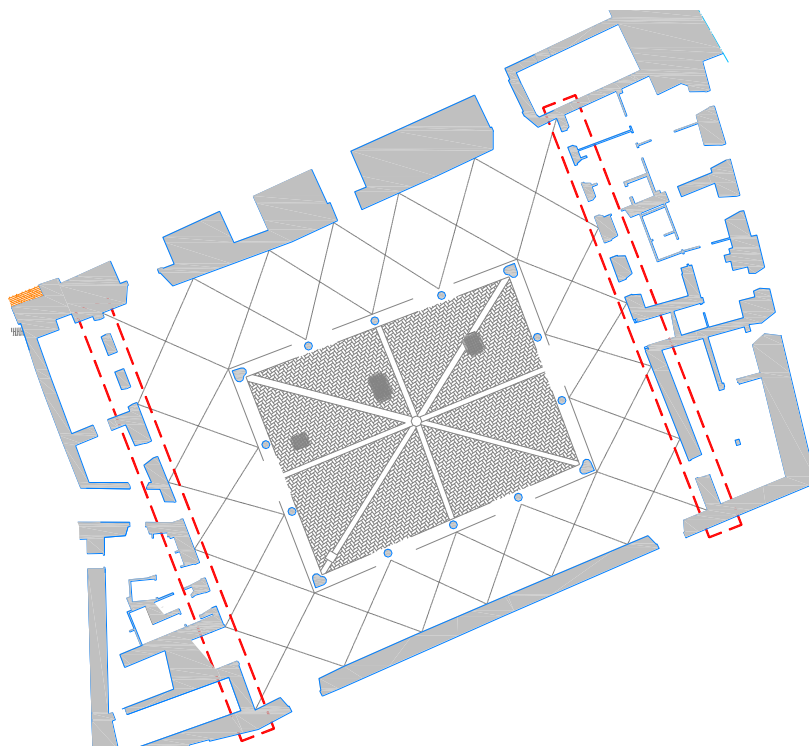


Figura 2.4 - Ubicazione delle pareti maggiormente danneggiate al piano Strada



Al piano Nobile, le pareti interne del Quadriportico non risultano efficacemente collegate alle pareti perimetrali (Figura 2.5): a nord le pareti presenti sono fortemente fessurate, mentre a sud sono in parte mancanti (campitura rossa) ed in parte caratterizzate da piccoli spessori. In Figura 2.6 è riportata un'immagine della fessurazione diagonale presente su una delle pareti sull'angolo nord-est.

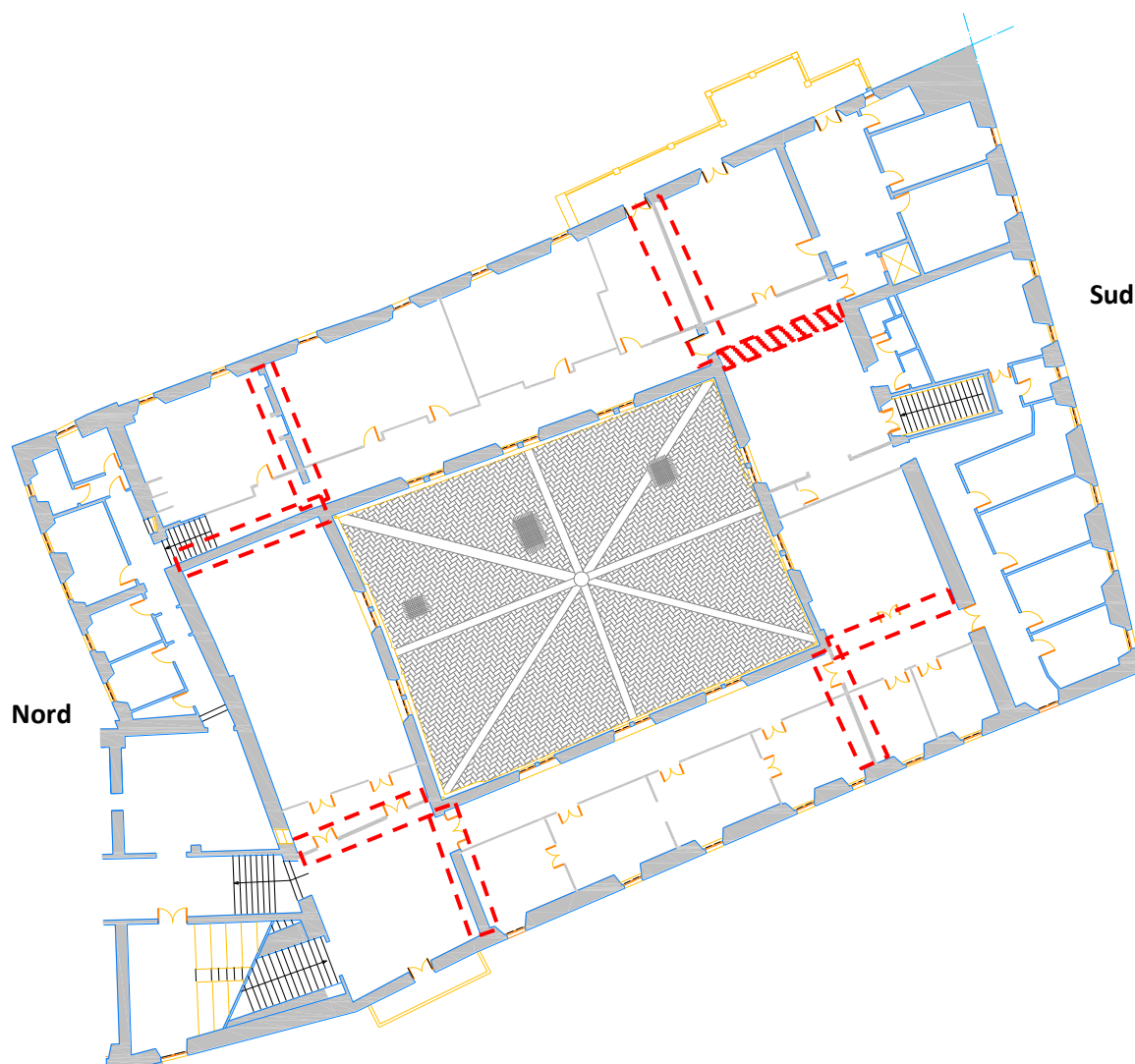


Figura 2.5 - Indicazione in pianta delle pareti di continuità sui quattro angoli



Figura 2.6 - Fessurazione diagonale su una parete del piano nobile

- Le pareti est ed ovest del piano Nobile sono state interessate da meccanismi locali di incipiente ribaltamento fuori dal piano, conseguenti alla mancanza di muri di spina trasversali adeguatamente ammortati e di un solaio di sottotetto o di copertura in grado di fornire un vincolo trasversale alle pareti stesse per trasferire le azioni orizzontali ai muri ortogonali. In Figura 2.5 è possibile notare come ortogonalmente ad entrambe le pareti vi siano solo divisorii leggeri.

Due situazioni significative sono evidenziate in Figura 2.7: la parete interna sul lato sud è stata interessata da un meccanismo locale di incipiente ribaltamento verso il portico, come mostrato in Figura 2.8, accompagnato da lesioni diagonali maggiori di  $45^\circ$  ed in una sola direzione sul divisorio ortogonale.

Il secondo meccanismo è anch'esso rappresentato da un principio di ribaltamento fuori piano della parete perimetrale esterna lato Orto Botanico, caratterizzato dalla formazione di una fessura sub-orizzontale all'altezza di circa 0,50 m dal pavimento (Figura 2.9), coincidente con la sommità dello sperone esterno (Figura 2.11), anch'esso accompagnato da lesioni a taglio con inclinazione maggiore di  $45^\circ$  sul divisorio ortogonale, ad evidenziare la mancanza di un adeguato ammortamento tra la parete esterna e le pareti divisorie ortogonali, che in

ogni caso sono rappresentate da elementi così sottili da non essere in grado di fornire un vincolo efficace alla ribaltamento.

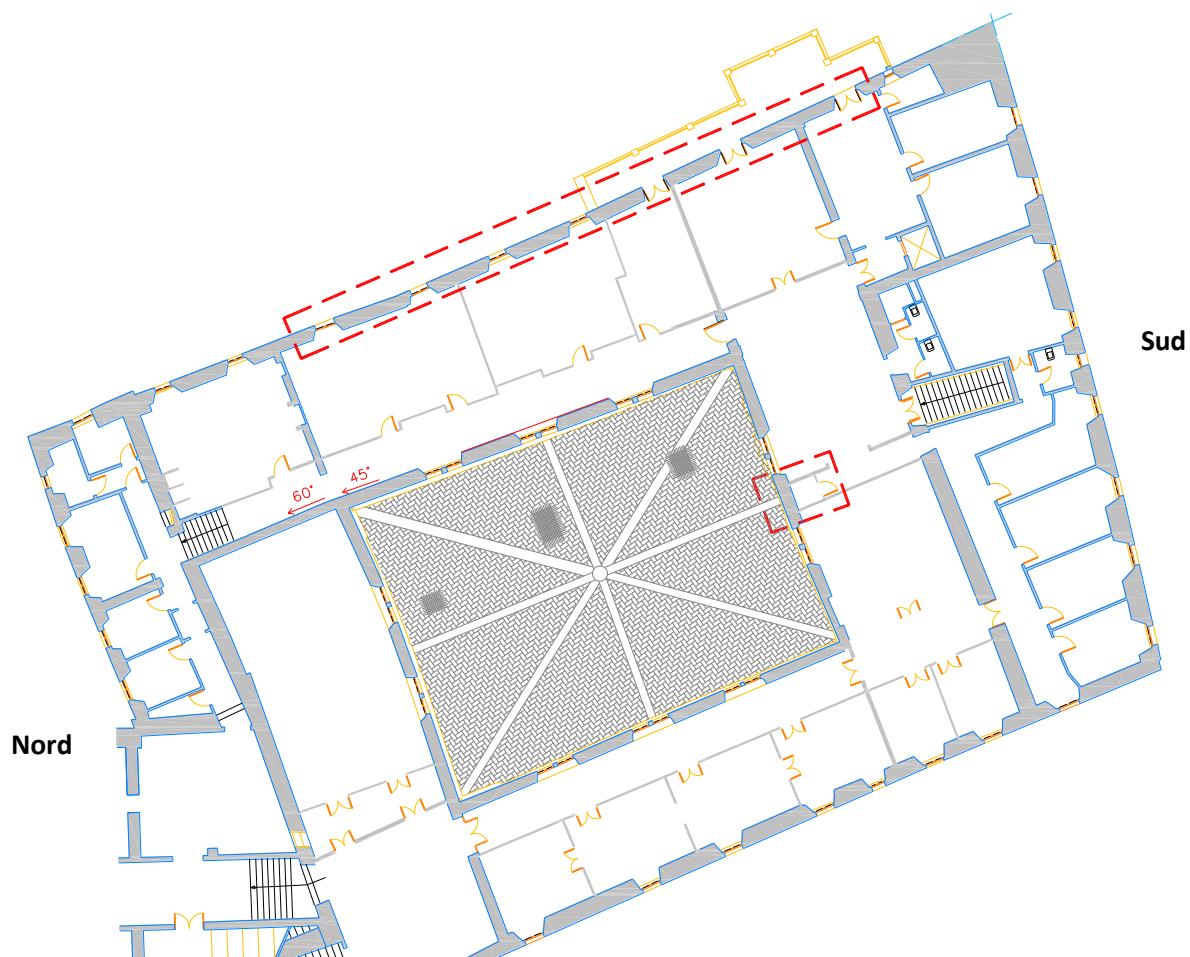


Figura 2.7 - Ubicazione dei due meccanismi locali



Figura 2.8 - Lesione legata al principio di ribaltamento della parete perimetrale lato portico

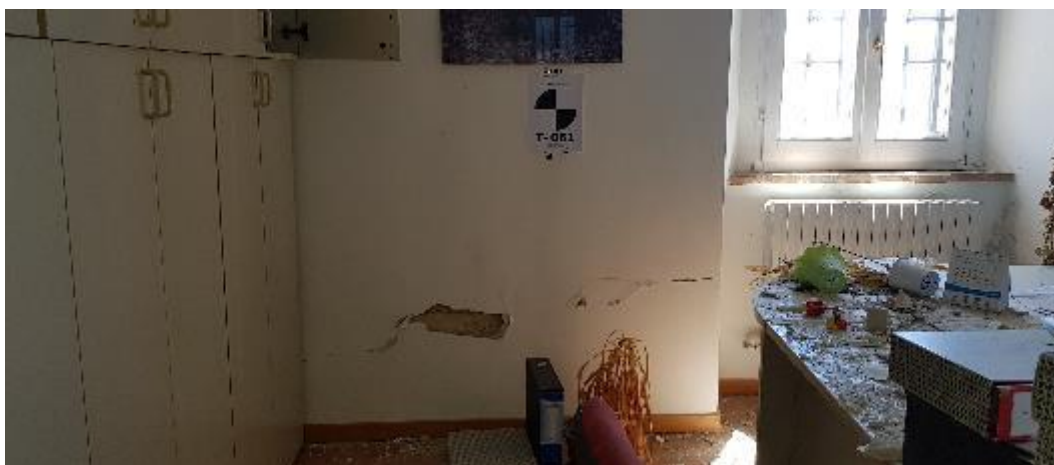


Figura 2.9 – Lesione sub-orizzontale a circa 50 cm al di sopra della pavimentazione della parete Est lato Orto Botanico



Figura 2.10 - Lesioni a taglio sui divisori ortogonali alla parete di Figura 2.9

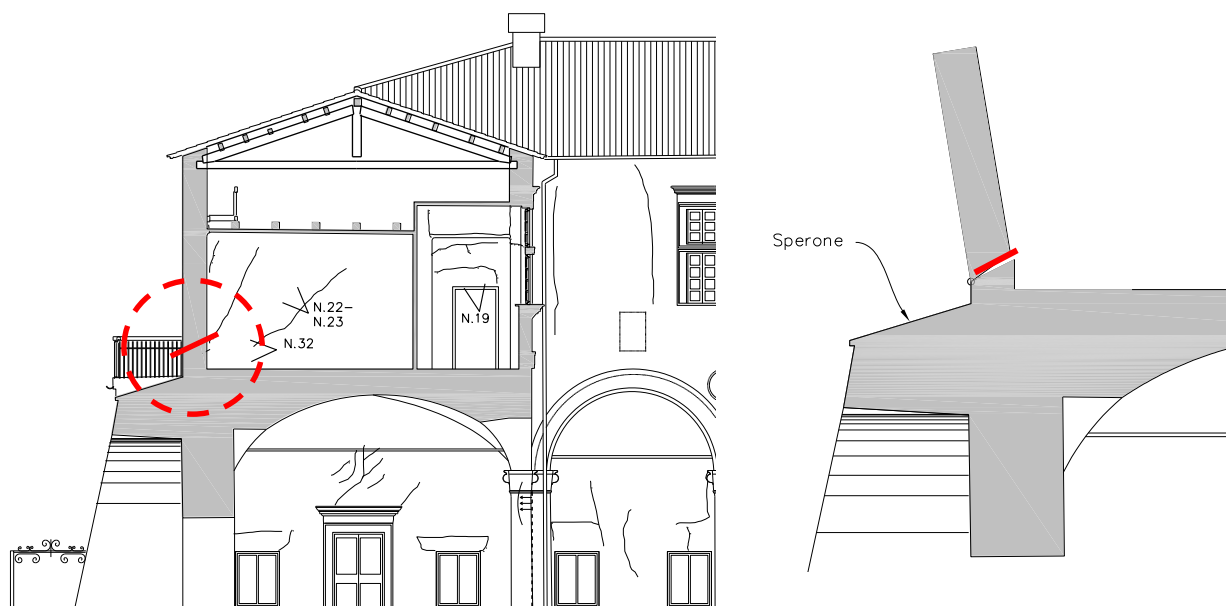


Figura 2.11 - Indicazione nella sezione trasversale del meccanismo locale di ribaltamento rappresentato in Figura 2.9

Di rilievo inoltre il crollò della porzione di parete al di sopra del balconcino sovrastante l'ingresso principale lato piazza (Figura 2.14), dovuto alla mancanza di elementi strutturali di "trattenimento", come ad esempio un cordolo sommitale, e per la presenza di due travi di copertura spingenti (Figura 2.13).

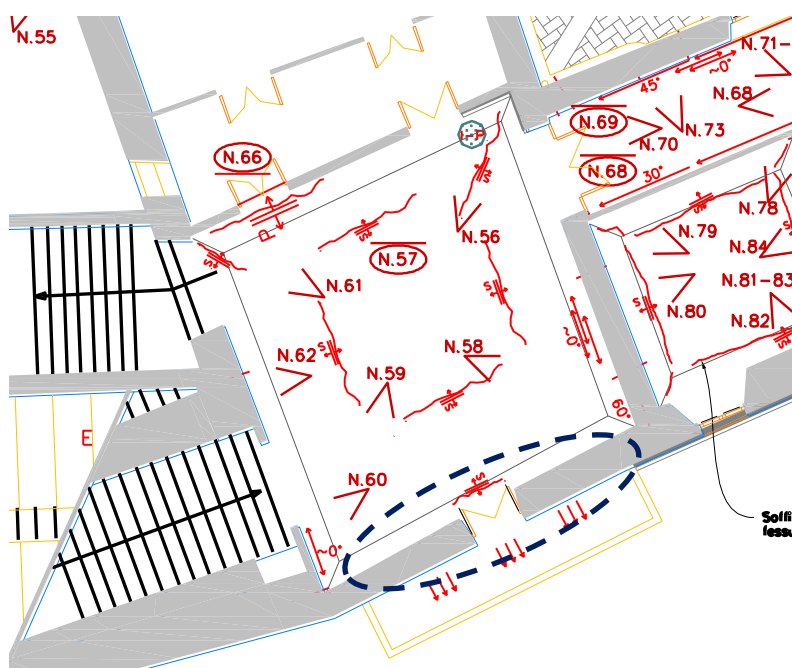


Figura 2.12 - Ubicazione della porzione di parete crollata



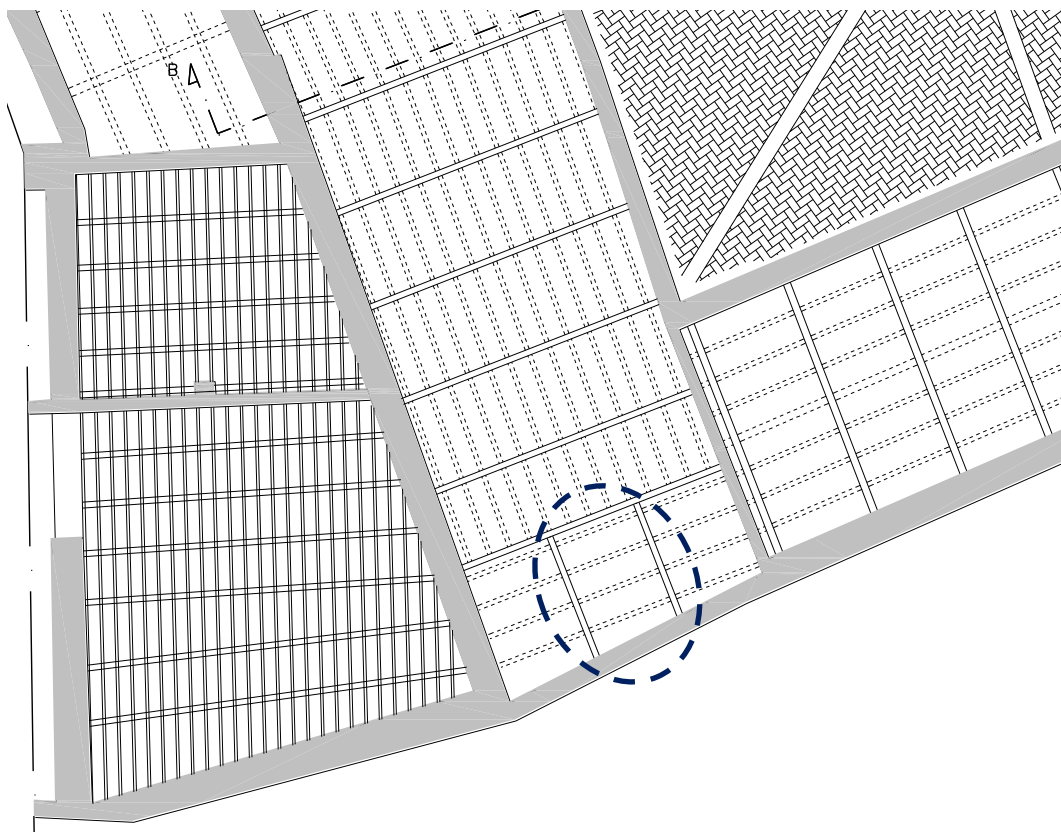



Figura 2.13 - Ubicazione delle due travi di copertura spingenti al di sopra dell'ingresso lato Piazza



Figura 2.14 - Porzione di parete crollata vista dall'interno

	UNIVERSITA' DI CAMERINO	LAVORI DI RIPARAZIONE E MIGLIORAMENTO SIMICO DEL PALAZZO DUCALE DI CAMERINO	RELAZIONE TECNICA
--	----------------------------	--	-------------------

Per quanto riguarda la seconda tipologia di danno, si riscontrano le seguenti situazioni:

- Presenza di fessure ad X sui setti murari del piano Strada dovuta alle ridotte dimensioni dei setti a causa delle numerose aperture sui due lati nord e sud del Quadriportico (Figura 2.15);
- Fessurazione lungo i bordi di nicchie esistenti richiuse non a regola d'arte, con una muratura non omogenea a quella esistente, e non adeguatamente ammorsata (Figura 2.16);
- Distacco dei due paramenti che costituiscono i pannelli murari, non adeguatamente ammorsati e riempiti con materiale sciolto e disomogeneo (Figura 2.17);
- Distacco del soffitto in camorcanna dalle pareti, con locali infiltrazioni di acqua piovana (Figura 2.18);
- Distacco dello spesso strato di intonaco superficiale, a base di cemento, dai blocchi di arenaria che costituiscono la parete (Figura 2.19);
- Fessurazione diffusa nella parte alta delle pareti, soprattutto al livello del sottotetto, per la bassa entità carico verticale (Figura 2.20);
- Lesioni nel punto di collegamento tra differenti elementi strutturali (Figura 2.21).

Oltre ai danni prodotti dal sisma si rileva il degrado superficiale dell'arenaria che costituisce il paramento esterno su larghi tratti delle pareti del Quadriportico lato Piazza (Figura 2.22), cui ne consegue una locale significativa riduzione dello spessore degli elementi che compongono il paramento esterno della parete lato Piazza.



Figura 2.15 - Fessurazione diffusa del paramento murario perimetrale lato nord del Quadriportico: sono visibili una serie di lesioni ad X in corrispondenza della porzione di maschio murario adiacente all'apertura



Figura 2.16 - Fessurazione lungo i bordi di nicchie richiuse



Figura 2.17 - Fessure per distacco dei due paramenti che costituiscono la parete lato Piazza del quadriportico



Figura 2.18 - Distacco del soffitto in camorcanna dalle pareti e locali infiltrazioni d'acqua



Figura 2.19 - Distacco dello spesso strato di intonaco superficiale dalla parete in arenaria



Figura 2.20 – Lesioni diffuse nella parte alta delle pareti per la bassa entità del carico verticale agente



Figura 2.21 - Lesioni nei punti di collegamento tra il corpo scala e l'arcata superiore di un'apertura





Figura 2.22 - Degrado superficiale dei blocchi di arenaria del paramento esterno della parete lato Piazza, con sensibile riduzione dello spessore degli elementi lapidei

## 2.2 Corpo B

Il Corpo B risulta caratterizzato da un quadro fessurativo di minore entità, se si esclude la porzione di sinistra in Figura 3.26, rappresentata dal corpo della vecchia Torre, che presenta pareti di spessore molto importante, realizzate in blocchi di pietra poco legati e il corpo scala, che ai piani alti risultano interessati da un importante quadro fessurativo.

La parte rimanente, formata da tre grandi aule voltate al Piano Strada, e dalla Facoltà di Giurisprudenza ai piani superiori, presenta un quadro fessurativo di lieve entità, caratterizzato da modeste lesioni diagonali sulle pareti perimetrali al Piano Strada, con piccole fessure e distacchi di intonaco all'intradosso delle volte. Ai piani superiori, le lesioni interessano quasi totalmente i divisori leggeri non-strutturali, e solo al Piano Nobile, sono presenti lesioni anche all'intradosso dei controsoffitti in camorcanna.

Nella figura che segue è riportato il quadro fessurativo al piano Nobile.

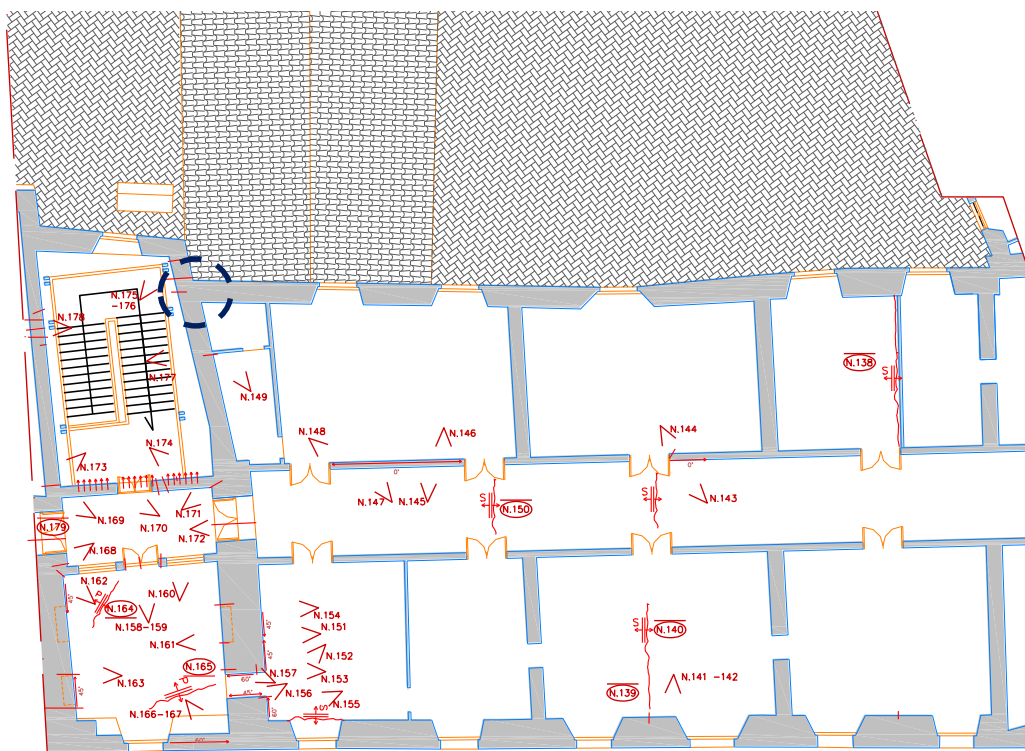


Figura 2.23 - Quadro fessurativo Piano Nobile

La porzione più a nord invece, come già detto, presenta un quadro fessurativo molto importante, a causa di una muratura molto caotica e sconnessa.

Al piano Strada, al piano degli Stemmi ed al piano Ammezzato non si riscontrano fessure significative, se non sulla parete perimetrale del vano scala (evidenziata in Figura 2.23) in corrispondenza della parete ortogonale della porzione più a Sud (Figura 2.24).



Figura 2.24 - Lesioni diffuse in corrispondenza della base del vano scala

I danni maggiori si riscontrano nel vano scala del piano Nobile, dove si evidenziano:

- Lesioni diffuse dovute alla scarsa qualità della tessitura muraria (Figura 2.25);
- Lesione verticale in corrispondenza dello spigolo a segnalare la totale assenza di ammorsamento tra pareti ortogonali (Figura 2.26);
- Crollo della porzione superiore della parete in corrispondenza della porta di accesso al vano scala (Figura 2.27 e Figura 2.28). La porzione di copertura crollata è stata ripristinata con un intervento di messa in sicurezza da parte dei VVF, mentre la porzione di parete non è stata ricostruita, ma è stato messo in sicurezza l'accesso alla scala.





Figura 2.25 – Lesioni diffuse al vano scala



Figura 2.26 – Lesione verticale per mancanza di ammortamento

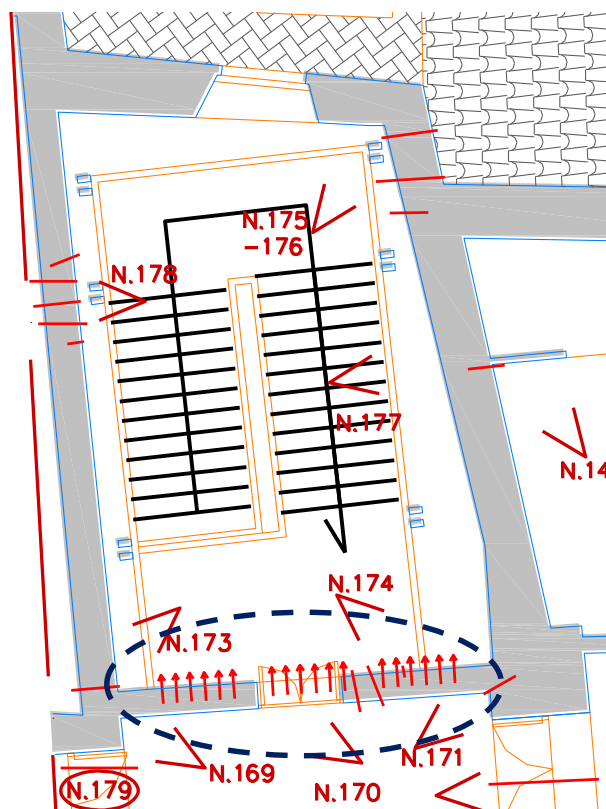


Figura 2.27 - Tratto interessato dal crollo della parete della scala



Figura 2.28 - Porzione di parete crollata e messa in sicurezza della copertura

Sulla Torre si evidenziano invece lesioni diffuse sul paramento interno di tutte e 4 le pareti perimetrali, dovute ad una tessitura muraria molto disomogenea e poco legata (Figura 2.29).



Sono inoltre presenti fessure in corrispondenza di nicchie richiuse con materiale non omogeneo e non adeguatamente ammorsato al paramento esistente.



Figura 2.29 - Lesioni diffuse sulle pareti della torre

## 2.3 Corpo C

Il Corpo C è caratterizzato dalla presenza di un quadro fessurativo piuttosto ampio (Figura 2.30), conseguenza della scarsa qualità della tessitura muraria.



Figura 2.30 - Quadro fessurativo caratteristico del Corpo C

Nelle figure che seguono è riportato nel dettaglio il quadro fessurativo del Corpo C.



Figura 2.31 - Quadro fessurativo Piano Strada



Figura 2.32 - Quadro fessurativo Piano Stemma

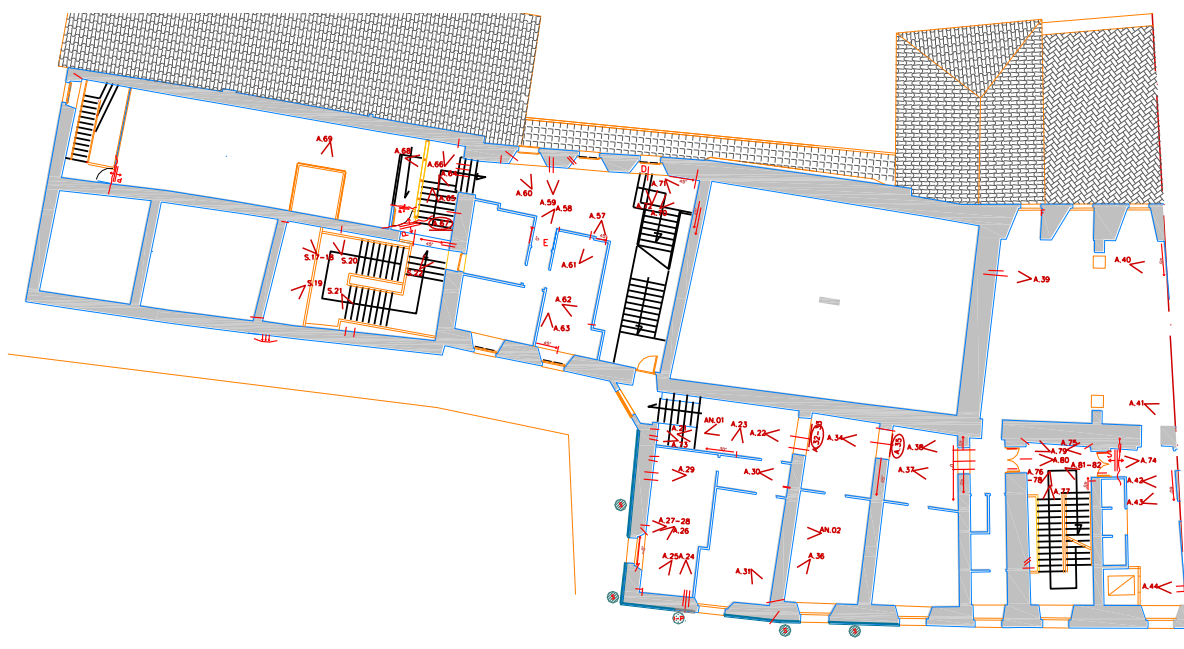


Figura 2.33 - Quadro fessurativo Piano Ammezzato



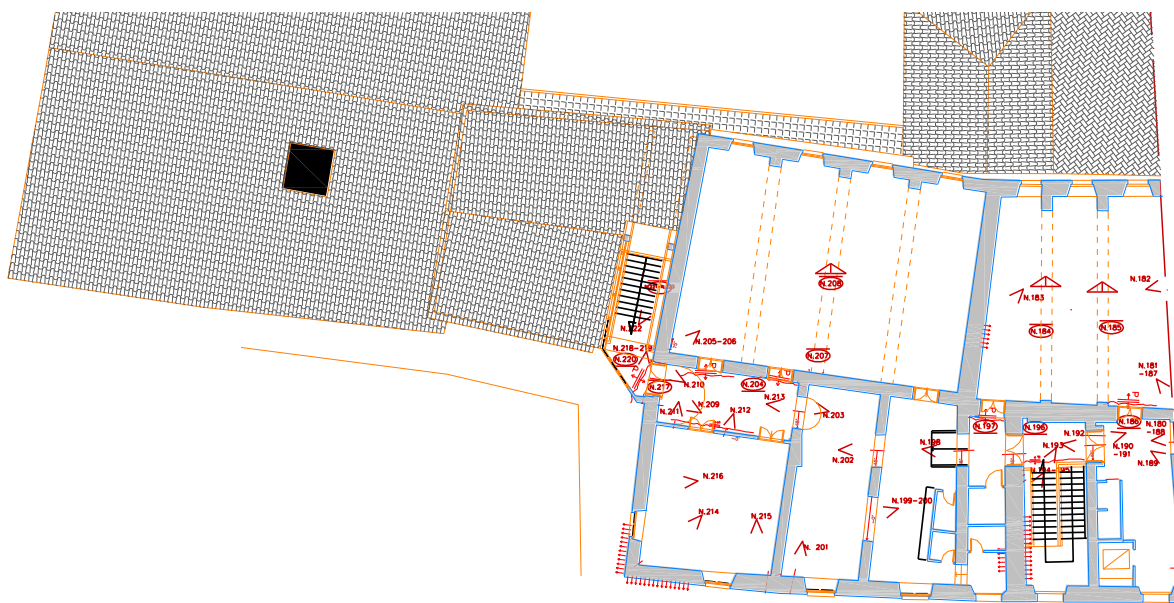


Figura 2.34 - Quadro fessurativo Piano Nobile

Si elencano le situazioni locali che hanno mostrato maggiori criticità:

1. In corrispondenza del loggiato posteriore al piano Strada, si riscontra la fessurazione, in chiave, di tutti gli archi del loggiato (Figura 2.35 a), nonché un livello di degrado piuttosto avanzato dei basamenti delle colonne di supporto (Figura 2.35 b).



a)



b)

Figura 2.35 - Quadro fessurativo del loggiato: a) fessure in chiave agli archi, b) degrado del basamento della colonna

2. La porzione della scala a chiocciola, che fa parte di un aggregato aggiunto successivamente alla costruzione del Corpo C, presenta, a tutte le elevazioni, lesioni verticali sulle pareti (Figura 2.37), ed orizzontali a livello della pavimentazioni, causate dal mancato ammassamento di questa porzione al Corpo C.

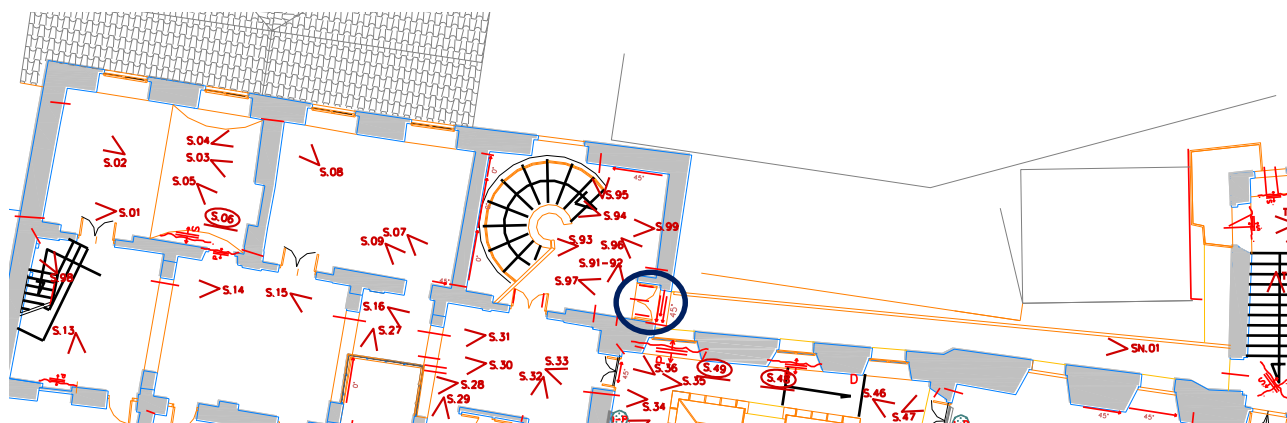


Figura 2.36 - Dettaglio del quadro fessurativo nel vano della scala a chiocciola



a)



b)

Figura 2.37 - Lesioni verticali sulle pareti per distacco del vano scala a chiocciola: a) al piano Strada, b) al piano Stemmi



Tale distacco è particolarmente evidente dalla lesione al di sopra della porta che collega la scala a chiocciola alla passerella esterna (cerchiata in Figura 2.36), come mostrato in Figura 2.38.



a)



b)

Figura 2.38 - Distacco della parete della scala a chiocciola al di sopra della porta indicata in Figura 2.36: a) vista dall'esterno, b) vista dall'interno

3. La Sala degli Stemmetti (Figura 2.39) presenta un quadro fessurativo molto importante, caratterizzato da:

- Distacco dell'intonaco dal paramento murario (Figura 2.40 a);
- Fessurazione diffusa (Figura 2.40 b) per la scarsa qualità della tessitura muraria e della discontinuità delle tipologie murarie, non adeguatamente ammorsate, che compongono le pareti;
- Alcune situazioni di fuori-piombo particolarmente evidenti nella parte alta delle pareti (Figura 2.41), probabilmente legate alla spinta del solaio della sala adiacente, non in quota con quello della Sala degli Stemmetti, come visibile dalla sezione trasversale di Figura 2.42;
- Crollo parziale del controsoffitto in cartongesso della Sala degli Stemmetti.



Figura 2.39 - Ubicazione della Sala degli Stemmetti al livello del piano degli Stemmi



a)



b)

Figura 2.40 - Quadro fessurativo delle pareti della Sala degli Stemmetti



Figura 2.41 - Fuori piombo delle pareti della Sala degli Stemmetti

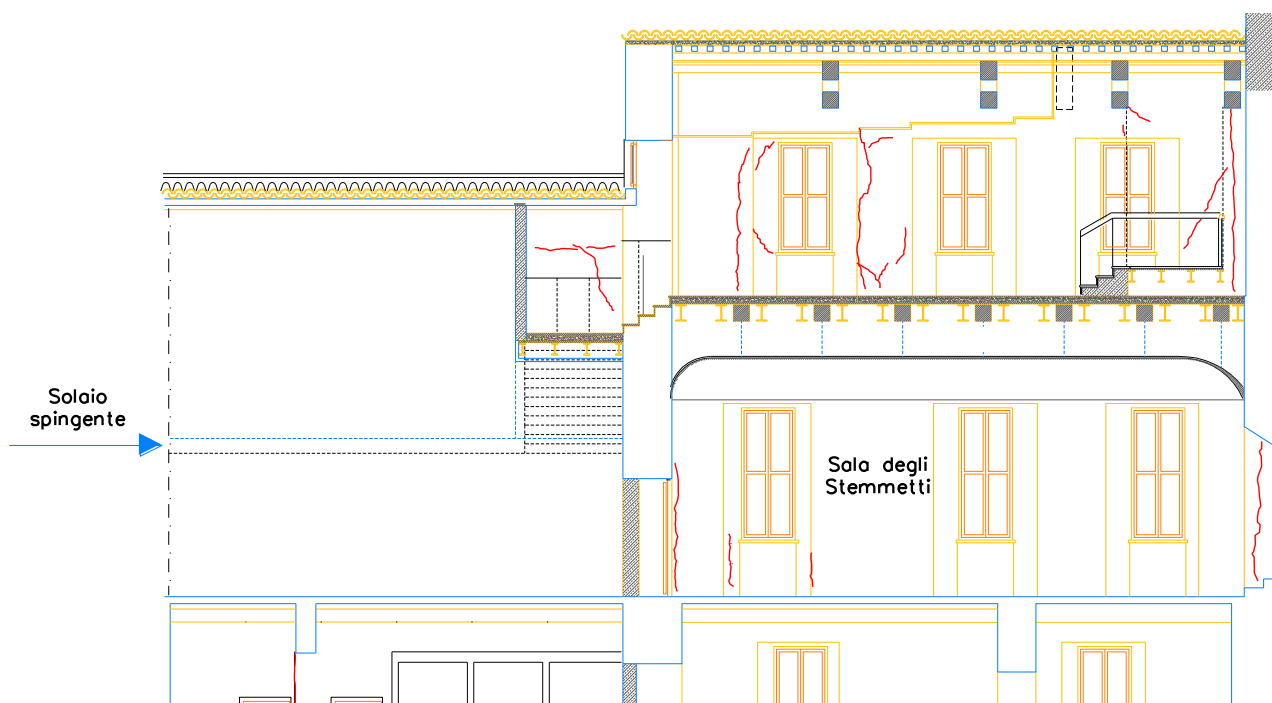


Figura 2.42 - Solaio spingente sulla parete sinistra della Sala degli Stemmetti



4. La Sala degli Stemmi è costituita da un volume a doppia altezza, con pareti totalmente intonacate e dipinte, che risultano fortemente danneggiata con:

- Distacco di porzioni significative di intonaco dalle pareti (Figura 2.43);
- Fessurazione diffusa della parete adiacente alla Sala degli Stemmi (Figura 2.44 a), dovuta alla scarsa qualità della tessitura muraria. Nella stessa Figura 2.44 b si nota una lesione orizzontale in corrispondenza di quella che sembra essere una catena orizzontale particolarmente superficiale;
- Lesioni orizzontali all'altezza dei solai delle sale adiacenti (Figura 2.45 e Figura 2.47) accompagnate da lesioni verticali in corrispondenza delle pareti delle sale adiacenti (Figura 2.46);
- Lesioni dovute al distacco della volta in cartongesso dalle pareti perimetrali (Figura 2.48).



Figura 2.43 - Caduta di porzioni di intonaco dalle pareti



a)



b)

Figura 2.44 - Quadro fessurativo della Sala degli Stemmi: a) fessurazione diffusa delle pareti, b) dettaglio della lesione orizzontale in corrispondenza della catena

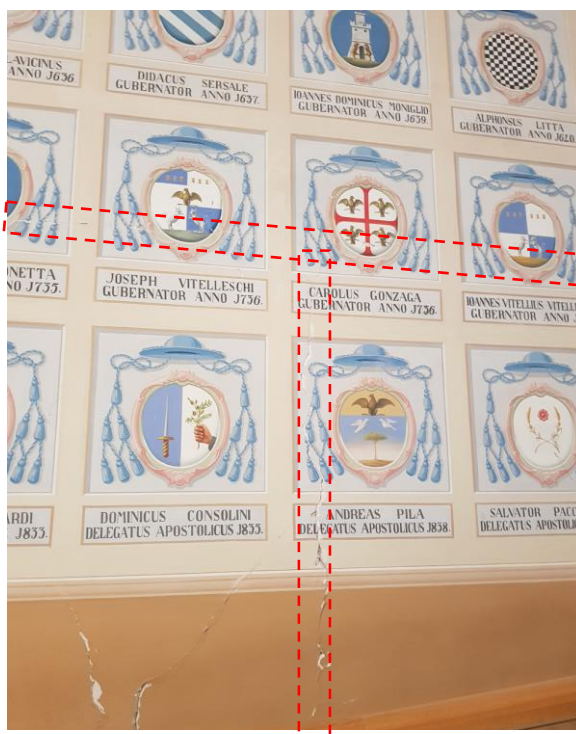


Figura 2.45 – Lesione orizzontale a livello del solaio delle sale adiacenti e verticale a livello delle pareti ortogonali delle sale adiacenti



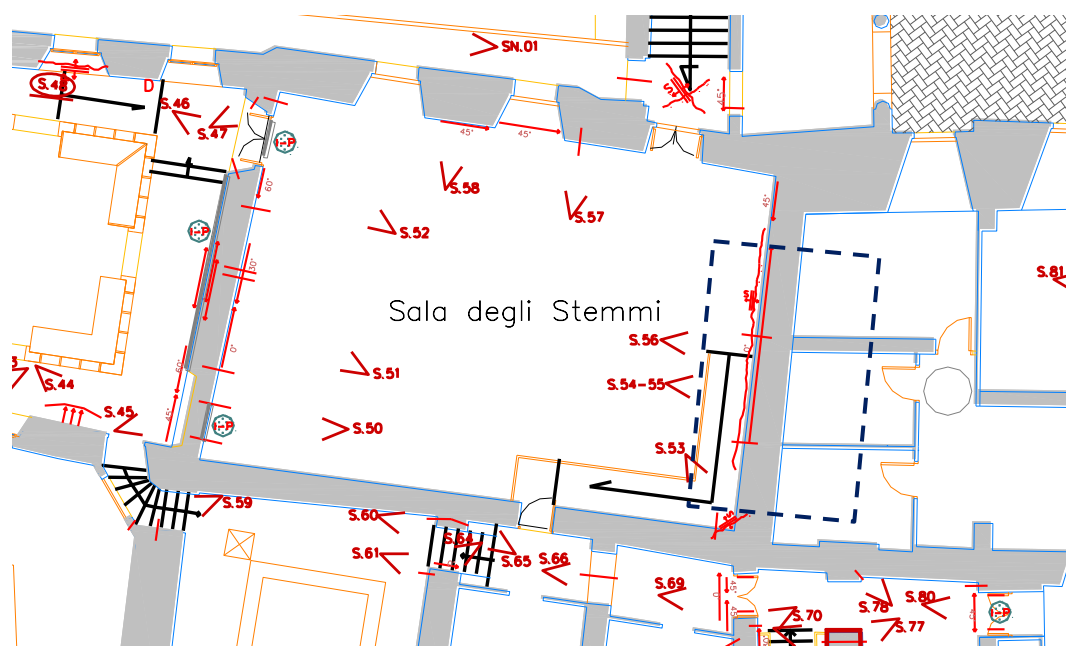


Figura 2.46 - Ubicazione delle zona caratterizzata da fessure verticali ed orizzontali: sono ben visibili le due pareti ortogonali in corrispondenza delle lesioni verticali

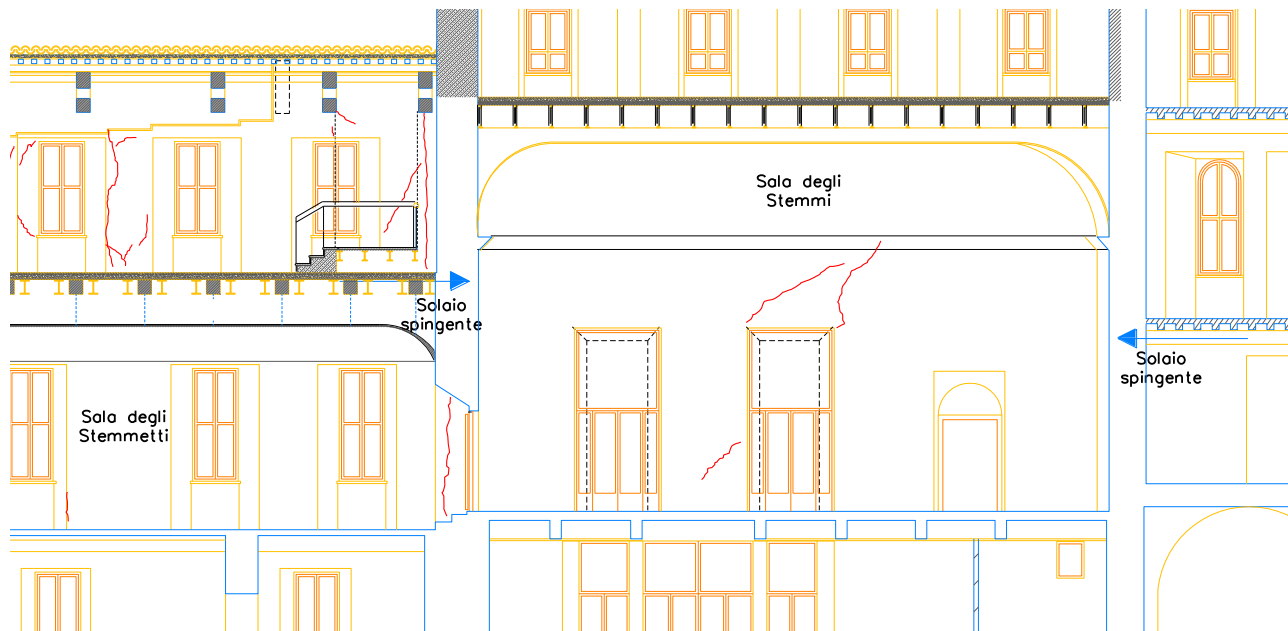


Figura 2.47 - Ubicazione sulla sezione trasversale dei solai spingenti sulle pareti della Sala degli Stemmai



Figura 2.48 - Distacco tra il controsoffitto in cartongesso e la parete

5. Lesione a taglio della parete del vano scala di sinistra dovuta alla forza concentrata applicata dalla catena (Figura 2.49).



Figura 2.49 - Lesione a taglio della parete

6. Fessurazioni diffuse nella zona evidenziata in Figura 2.50 al livello del piano Ammezzato, per la presenza di pareti di spessore molto importante con tessitura muraria irregolare (Figura 2.51). In Figura 2.52 è mostrato l'appoggio di una trave in legno al di sopra di un'apertura, senza la presenza di un adeguato architrave, che ha prodotto la rottura locale dell'architrave in muratura e la conseguente caduta di due mattoni. Il fatto che il giunto di malta sia rimasto nella sua posizione originale evidenzia la mancanza di adesione tra i mattoni e la malta dei giunti.



Figura 2.50 - Ubicazione della zona di cui al Punto 6.



Figura 2.51 – Tessitura muraria delle pareti



Figura 2.52 - Appoggio della trave in legno sull'architrave in muratura di mattoni



7. Il vano scala indicato in Figura 2.53 ospita una scala in legno collegata puntualmente alle pareti laterali solo in corrispondenza dei pianerottoli. Le due pareti hanno altezza libera molto importante e risultano interessate da un quadro fessurativo molto ampio e diffuso, a causa di una tessitura muraria caotica e disomogenea, con presenza di molte nicchie ed aperture non adeguatamente richiuse, o non richiuse (Figura 2.54).

Per la parete di destra di tale vano scala si evidenzia inoltre la presenza di un crollo di importanti dimensioni che ha interessato maggiormente il paramento murario lato scala nella parte più alta della parete (Figura 2.55). Il crollo è imputabile, come già detto, alla scarsa qualità della muratura ed alla mancanza di diatoni e idonei giunti di malta. Il crollo del solo paramento lato scala nella parte più bassa può essere dovuto alla presenza di una serie di pareti ortogonali, seppur non-strutturali, nel vano adiacente a quello della scala (Figura 2.56) che hanno trattenuto il paramento dal crollo.

La maggior parte delle macerie relative al crollo al momento grava sul pianerottolo intermedio della scala in legno (Figura 2.57), la quale risulta localmente danneggiata proprio dal crollo stesso.

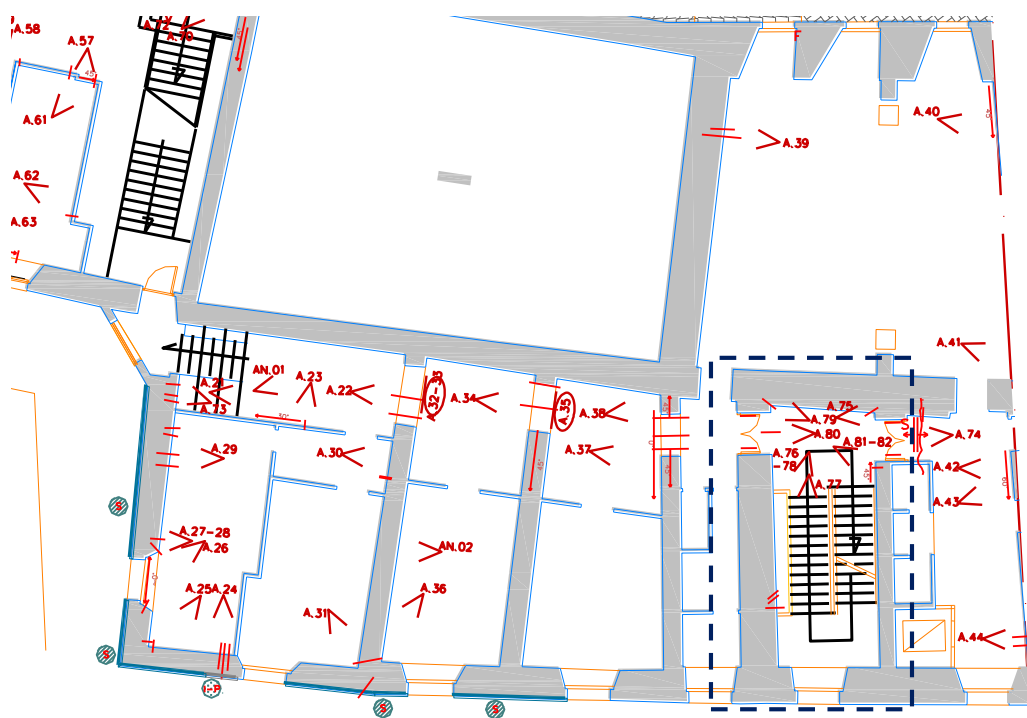


Figura 2.53 - Ubicazione del vano scala





Figura 2.54 - Dettaglio del collegamento puntuale della scala in legno alla parete e del quadro fessurativo in cui è ben evidente la disomogeneità della tessitura muraria



Figura 2.55 - Crollo della parte alta della parete: è ben visibile la separazione tra i due paramenti murari e il riempimento in materiale sciolto

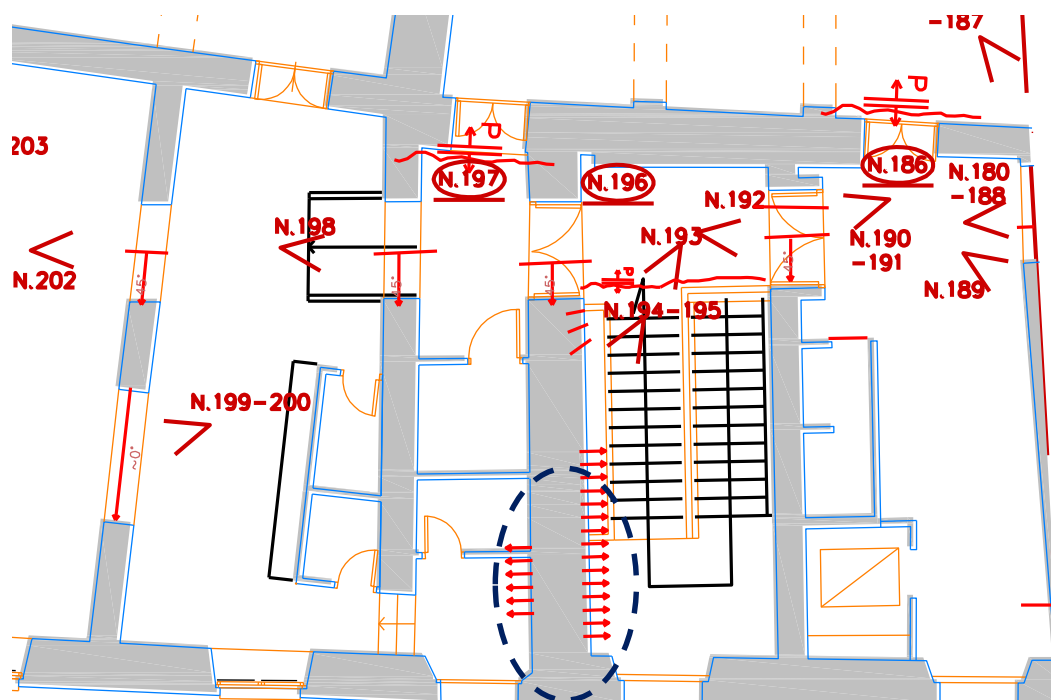


Figura 2.56 - Ubicazione della porzione interessata dal crollo al livello del piano Nobile



Figura 2.57 - Accumulo delle macerie sul pianerottolo della scala in legno in seguito al crollo della parete soprastante

8. Crollo dell'angolata nella parte alta della parete evidenziata in Figura 2.58 con successiva messa in sicurezza da parte dei VVF. Il crollo ha interessato la parte superiore della parete al di sopra della finestra di sinistra (Figura 2.59); sulla parte alta delle pareti vicine, in corrispondenza degli appoggi delle travi in legno della copertura, sono inoltre presenti lesioni diffuse.

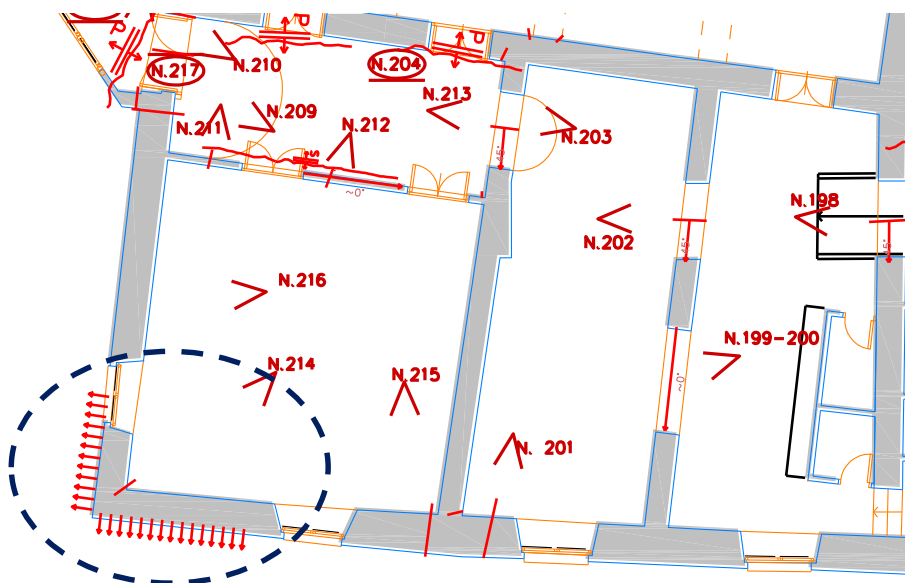


Figura 2.58 - Ubicazione dell'angolata crollata



Figura 2.59 - Crollo dell'angolata e messa in sicurezza dei VVF



9. Tutti gli archi delle aperture dei corridoi indicati in Figura 2.60 per il piano Ammezzato, ed in Figura 2.61 per il piano Nobile, presentano fessure in chiave e alle reni, come mostrato nelle foto che seguono.

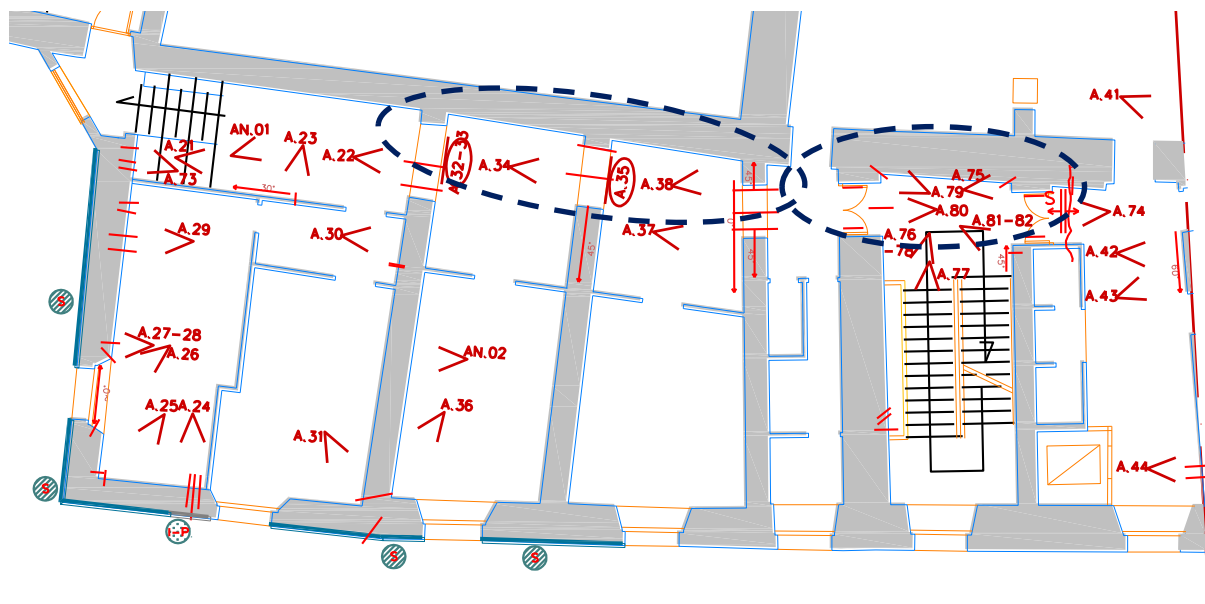


Figura 2.60 - Ubicazione degli archi fessurati al piano Ammezzato

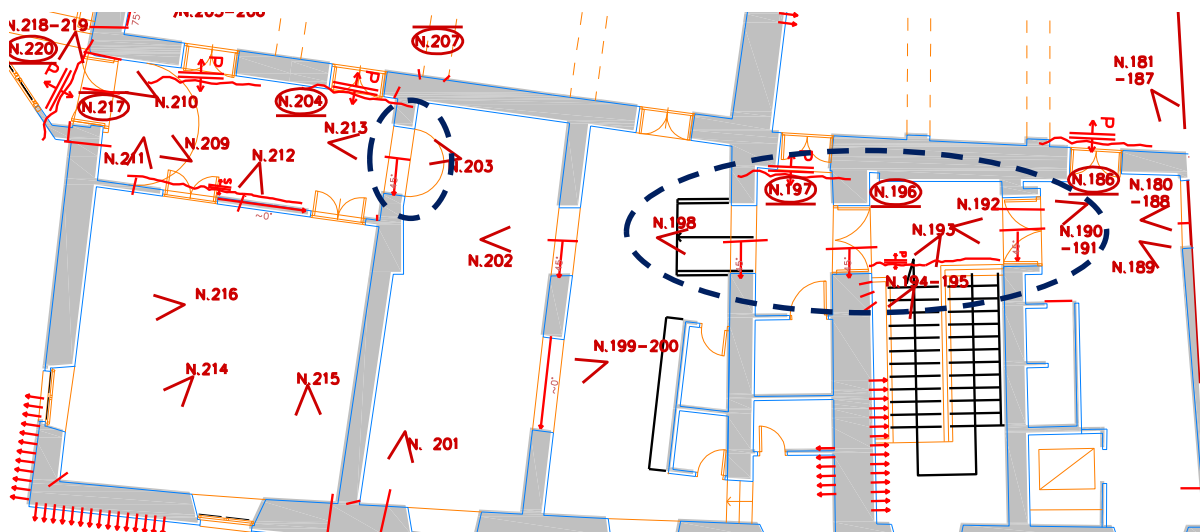


Figura 2.61 - Ubicazione degli archi fessurati al piano Nobile





Figura 2.62 - Quadro fessurativo degli archi del piano Ammezzato



Figura 2.63 - Quadro fessurativo degli archi del piano Nobile e messa in sicurezza da parte dei VVF

### 3 Piano di indagini

In questo capitolo si illustrano i risultati delle indagini eseguite per l'acquisizione di un Livello di Conoscenza LC2 a supporto della valutazione della vulnerabilità sismica del Palazzo Ducale.

Preliminarmente all'esecuzione delle indagini, è stata condotta una ricerca presso gli archivi dell'ufficio tecnico dell'Università di Camerino e della Soprintendenza Archeologica, Belle Arti e Paesaggio delle Marche degli elaborati progettuali così da riuscire a tracciare un percorso di tutti gli interventi, sia a livello strutturale che funzionale, intercorsi nei vari anni.

La campagna di indagini è stata estesa a tutta la costruzione, con lo scopo di raggiungere una conoscenza omogenea di tutti i dettagli strutturalmente significativi della costruzione, prevedendo approfondimenti sulle porzioni più rilevanti ai fini della risposta sismica.

Tale obiettivo è stato raggiunto nelle seguenti fasi:

1. Reperimento ed analisi di tutta la documentazione storica disponibile, sia in merito allo Stato di Fatto della costruzione, che a tutte le successive modifiche intercorse negli anni, in seguito ad interventi e/o riparazioni;
2. Verifica dell'accuratezza dei rilievi architettonici disponibili e rilievo specialistico della zona del quadriportico, che rappresenta l'aggregato strutturalmente più complesso;
3. Rilievo dei principali dettagli strutturali, quali le tipologie di orizzontamenti, di coperture e delle strutture murarie in elevazione;
4. Analisi del quadro fessurativo generato dagli eventi sismici del 2016;
5. Esecuzione della campagna di indagini strutturali, limitando le indagini maggiormente impattanti, sugli orizzontamenti, sui pannelli murari e sul colonnato del Quadriportico;
6. Interpretazione delle indagini per l'identificazione delle stratigrafie degli orizzontamenti, per lo studio della tessitura e dello spessore dei pannelli murari, per la caratterizzazione meccanica delle murature e delle arenarie di fondazione, per lo studio delle colonne del Quadriportico e per la valutazione delle proprietà dinamiche e del tiro delle catene del Quadriportico.

### 3.1 Campagna di indagine

Le indagini eseguite comprendono:

- Saggi endoscopici sulle pareti murarie e sui solai per la determinazione della stratigrafia;
- Rimozioni locali di intonaco in prossimità delle lesioni e delle intersezioni murarie per la valutazione dell'estensione del quadro fessurativo, del grado di ammorsamento e della qualità della tessitura muraria;
- Sondaggi all'estradosso e all'intradosso degli orizzontamenti di piano;
- Martinetti piatti doppi per la determinazione delle caratteristiche di deformazione dei pannelli murari principali;
- Prove ultrasoniche sulle colonne del Quadriportico per la valutazione qualitativa dell'omogeneità del materiale;
- Indagini radiografiche delle colonne del Quadriportico per la valutazione dello stato di conservazione e per l'identificazione delle barre di armatura interne inserite nell'ambito di un intervento della Soprintendenza negli anni 70;
- Prove di schiacciamento di provini del substrato di arenaria estratti al livello del piano botanico;
- Prove dinamiche di impatto con martello strumentato sulle catene del Quadriportico per la valutazione delle proprietà dinamiche modali e del tiro.

### 3.2 Prove endoscopiche e saggi localizzati

Le endoscopie, eseguite mediante boroscopio flessibile in foro  $\phi 32$  mm, hanno permesso di identificare le stratigrafie sia degli orizzontamenti del piano ammezzato e nobile (19 endoscopie) che dei pannelli murari in elevazione (45 endoscopie) del piano strada, ammezzato e nobile.

Le endoscopie sono state affiancate da piccole demolizioni, rimozioni di intonaco e/o tasche di sondaggio localizzate in limitate porzioni degli elementi strutturali da indagare, ubicate all'intradosso e all'estradosso dei solai e sulle pareti murarie, le quali hanno permesso di confermare la tipologia strutturale degli orizzontamenti e delle pareti.

Le indagini sono state eseguite dividendo il fabbricato in 3 corpi distinti, come indicato in Figura 2.1, ed ai quali si farà riferimento nel seguito.

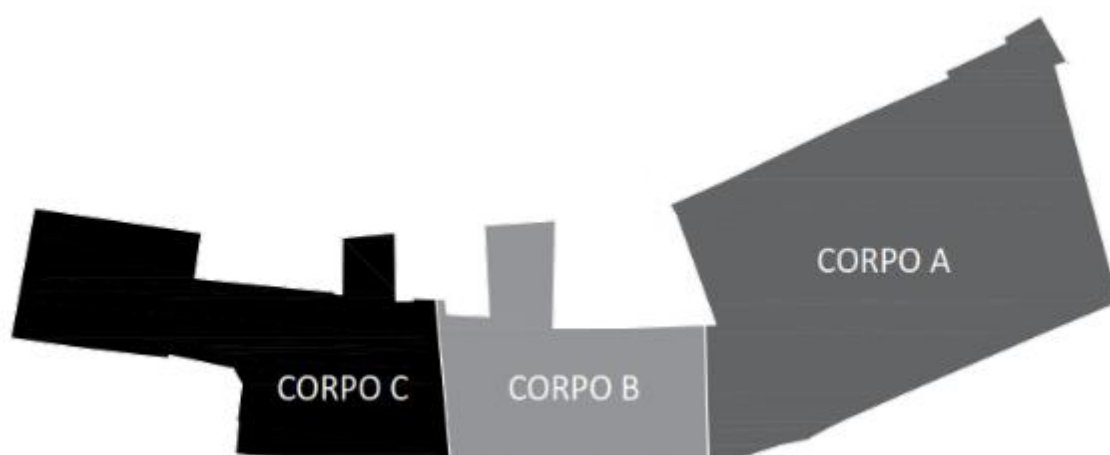


Figura 3.1 - Suddivisione del fabbricato per le indagini

Nel seguito sono riportati alcuni risultati dei saggi stratigrafici desunti dalle endoscopie.



### 3.2.1 Pareti

I pannelli murari indagati presentano tutti una stratigrafia riconducibile ad una muratura a sacco, con due paramenti esterni in blocchi di arenaria di vario spessore (dai 15 ai 40 cm) diversamente rivestite in funzione della zona di indagine (intonaco, cartongesso o mattoni forati) riempite all'interno con materiale di risulta poco consistente, costituito principalmente da materiale lapideo in arenaria.

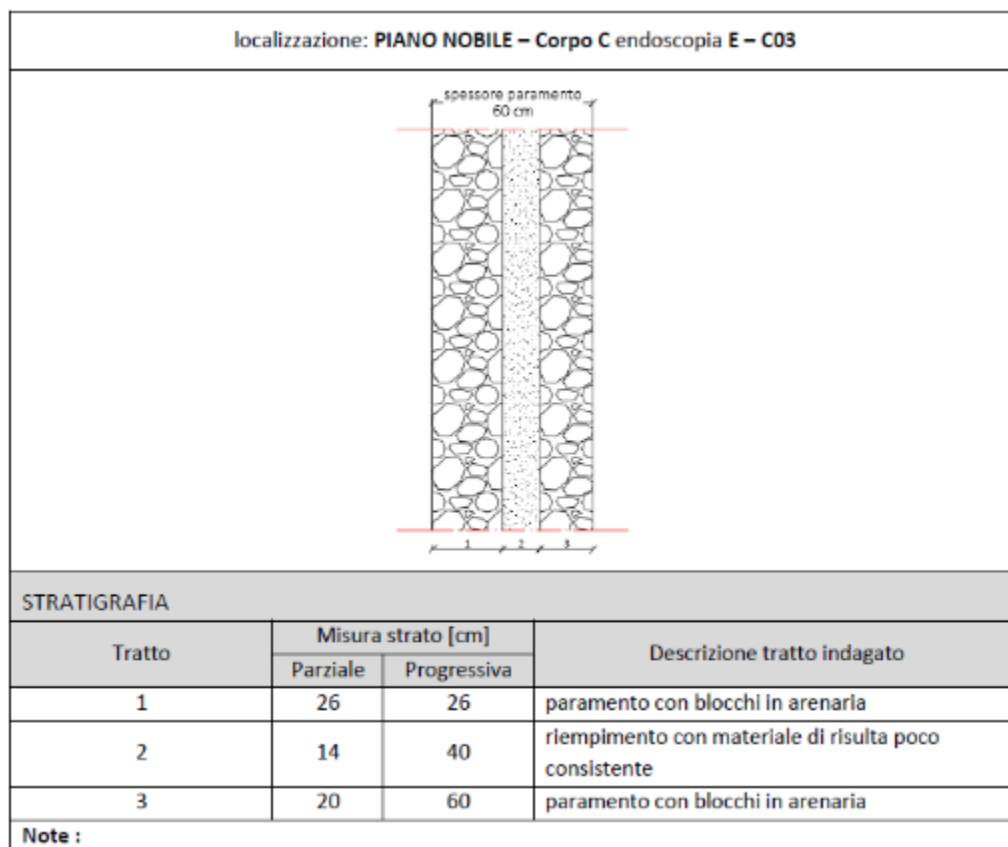


Figura 3.2 - Esempio di stratigrafia dei pannelli murari

In generale la tessitura delle pareti risulta molto caotica, caratterizzata da giunti di malta poco consistenti e irregolari, come mostrato in Figura 3.3. Inoltre, la quasi totalità delle pareti ortogonali dei Corpi A e B presentano uno scarso, se non assente, ammorsamento con le pareti perimetrali principali, come mostrato in Figura 3.5 per il Piano Ammezzato del Corpo B; nemmeno le pareti di mattoni pieni di più recente costruzione, quali quelle perimetrali all'ufficio del Rettore (Piano Nobile Corpo A), sono state adeguatamente collegate alle pareti perimetrali del fabbricato (Figura 3.4).



Figura 3.3 - Rimozione di intonaco su una delle pareti perimetrali del Piano Nobile

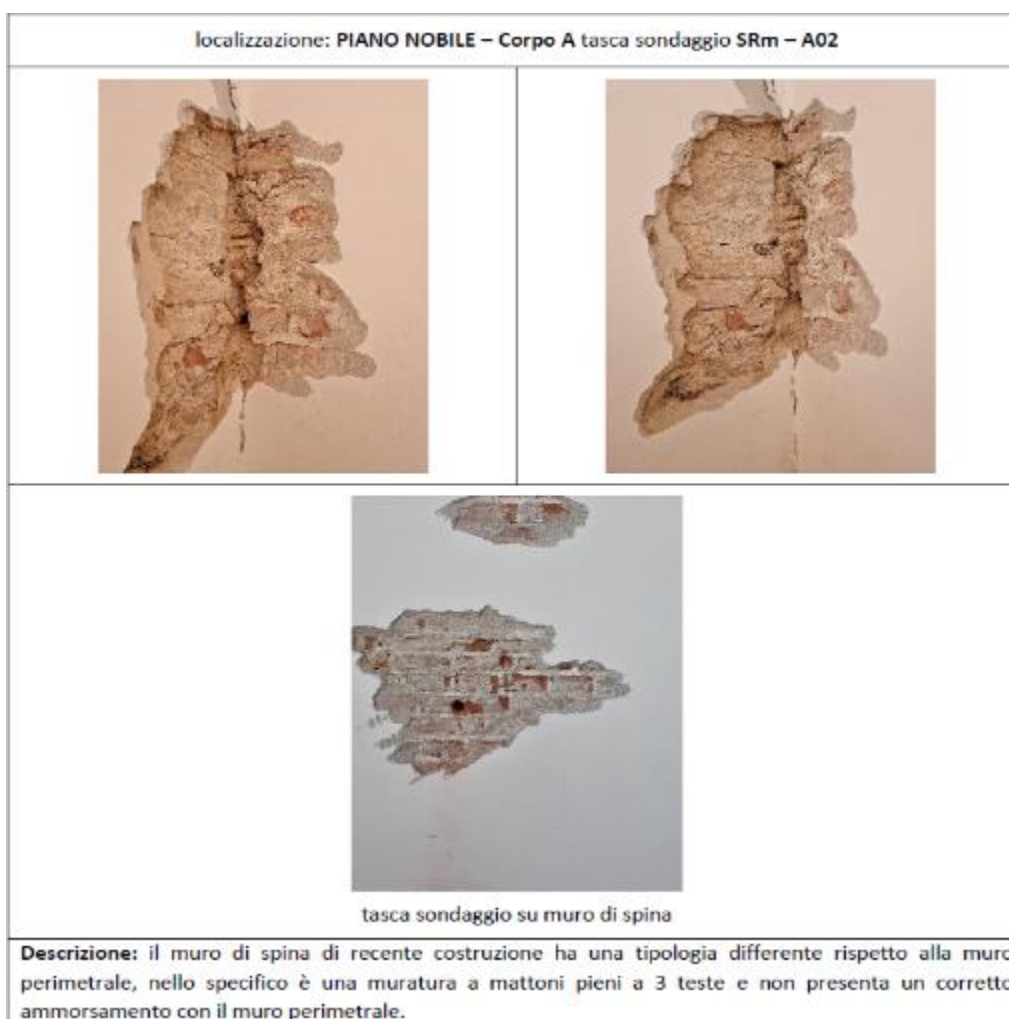


Figura 3.4 - Rimozione di intonaco in corrispondenza dello spigolo di collegamento tra due pareti di diverse epoche



Figura 3.5 - Rimozione di intonaco in corrispondenza di uno spigolo delle pareti del Piano Ammezzato del Corpo B

Le pareti dell'ala del Quadriportico lato piazza sono internamente rivestite da un intonaco a base di cemento, per la linearizzazione superficiale della parete, di spessore molto consistente (fino a 7 cm) (Figura 3.6), completamente distaccato dal supporto in muratura (Figura 3.7).



Figura 3.6 - Rimozione di intonaco sulla parete interna lato Quadriportico



Figura 3.7 - Rimozione di intonaco sulla parete perimetrale lato piazza

Il mancato ammorsamento delle pareti di spina con quelle perimetrali ha generato, in alcuni casi, un meccanismo di ribaltamento verso l'esterno della parete perimetrale.



Figura 3.8 – Possibile meccanismo di ribaltamento della parete perimetrale visibile dalla fessura sulla pavimentazione



### 3.2.2 Solai Corpo A

Nelle figure seguenti è riportata l'ubicazione delle indagini sul Corpo A.

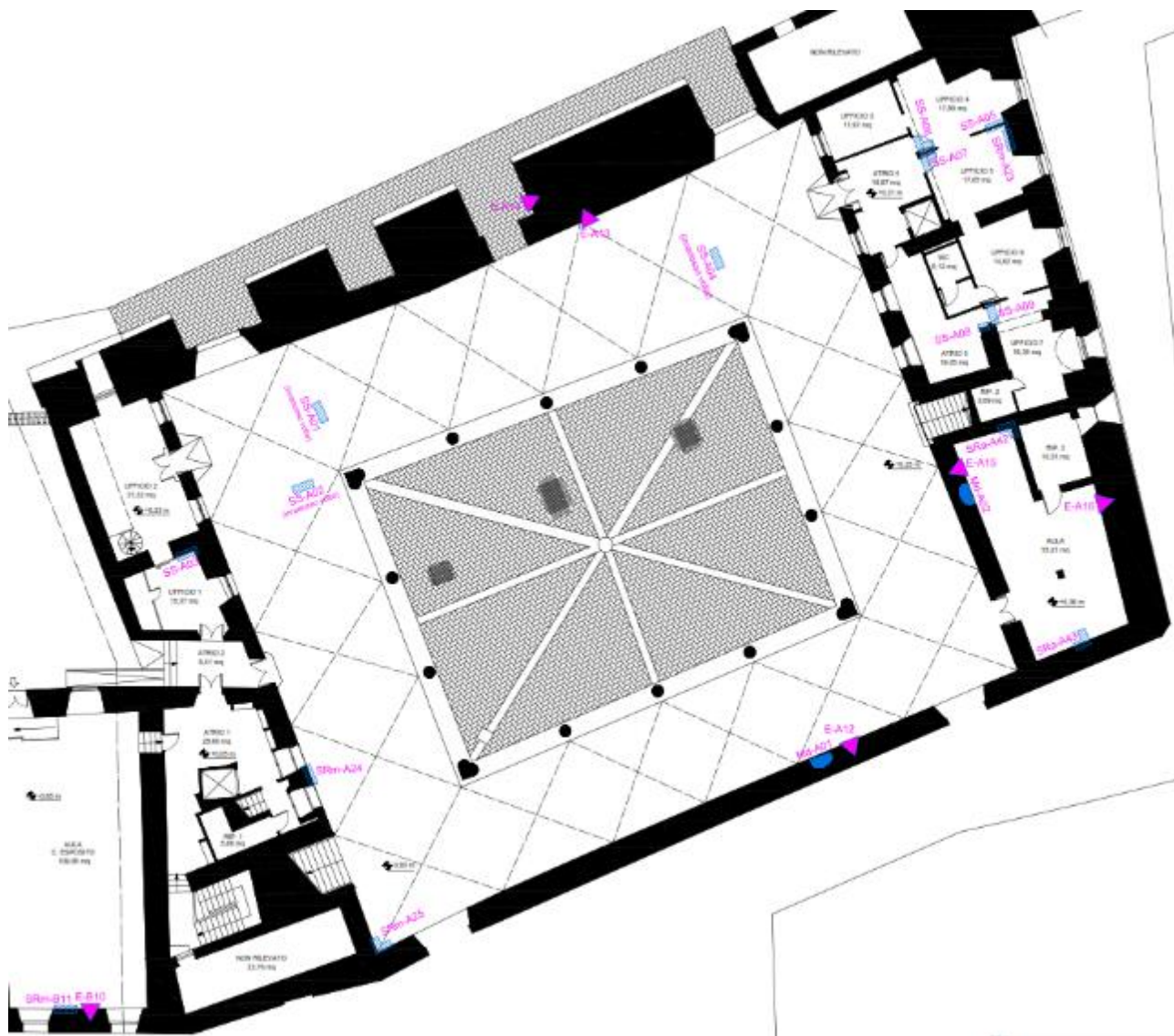


Figura 3.9 - Ubicazione indagini al Piano Strada (Corpo A)

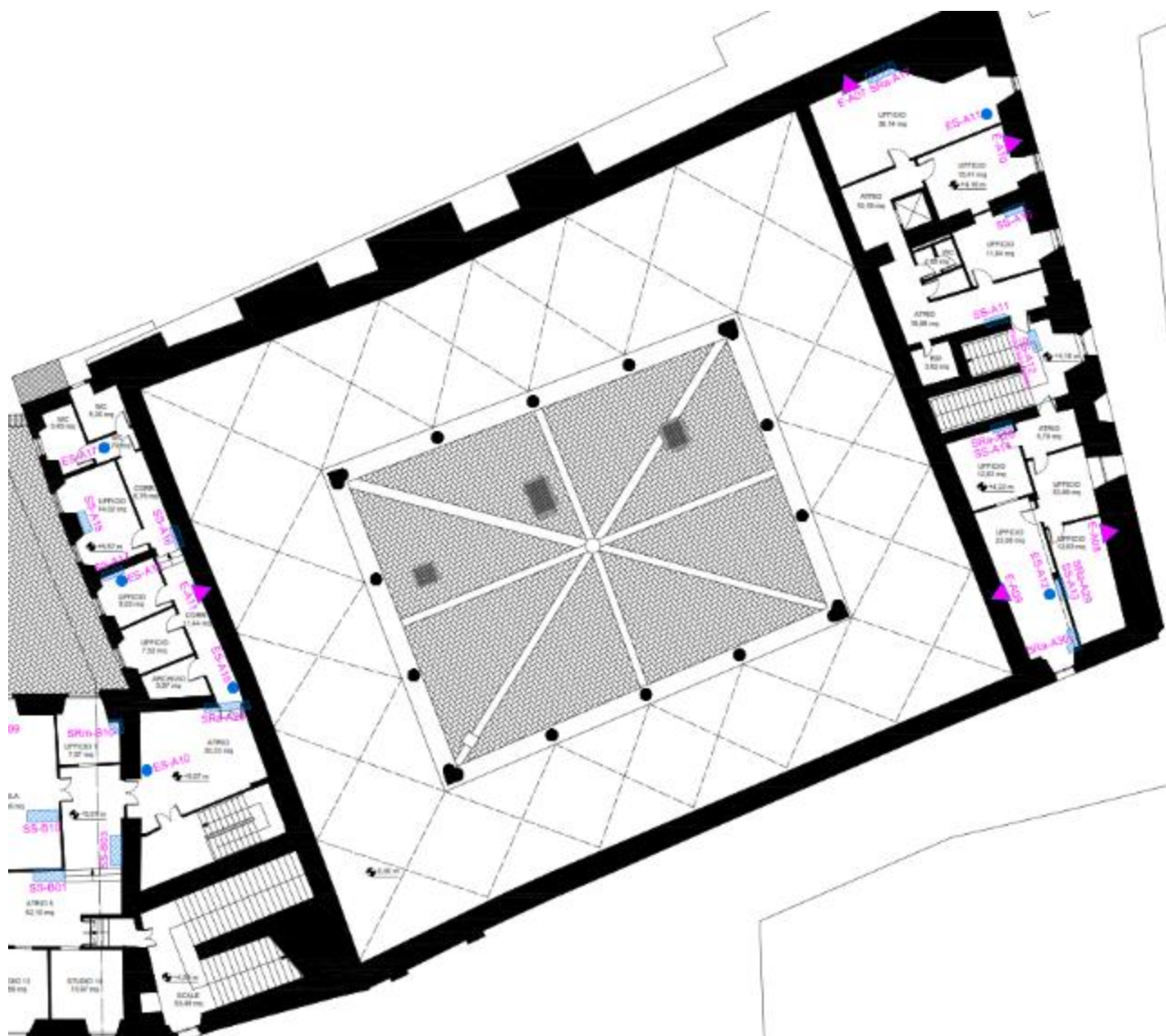


Figura 3.10 - Ubicazione delle indagini al Piano Ammezzato (Corpo A)



Figura 3.11 - Ubicazione delle indagini al Piano Nobile (Corpo A)

Le volte del Quadriportico presentano una costolatura in mattoni pieni ed un riempimento superiore in materiale alleggerito (Figura 3.12).



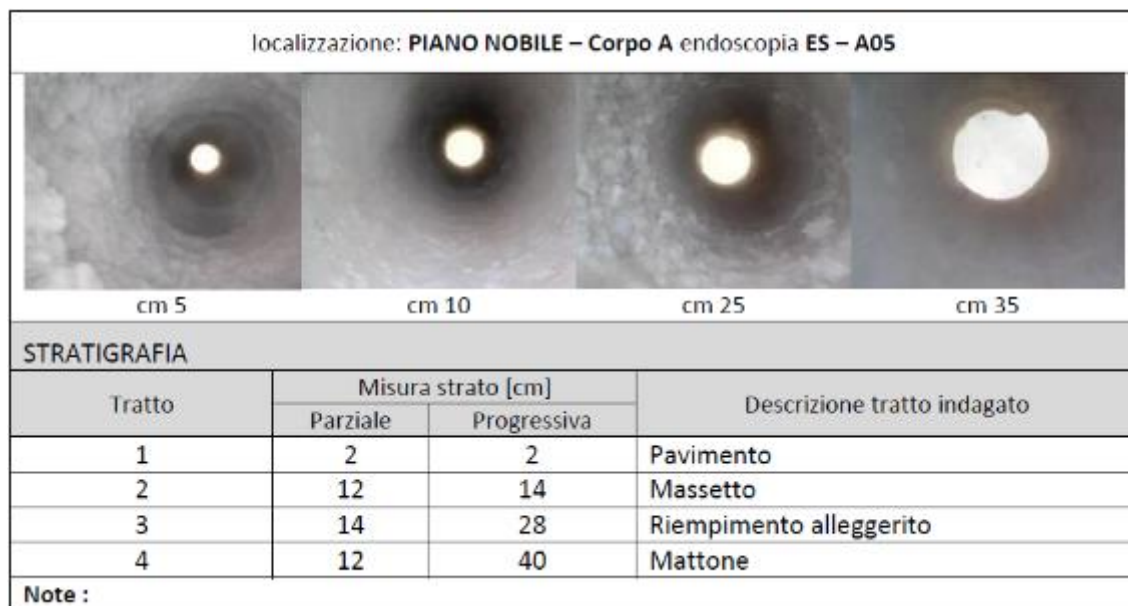


Figura 3.12 - Endoscopia eseguita in chiave ad una delle volte del Quadriportico

Il solaio di calpestio del Piano Nobile è realizzato mediante un massetto di circa 12-18 cm (che in alcune endoscopie viene indicato come soletta) sul lato piazza e con putrelle in acciaio e voltine in laterizio sul lato orto botanico (Figura 3.13).

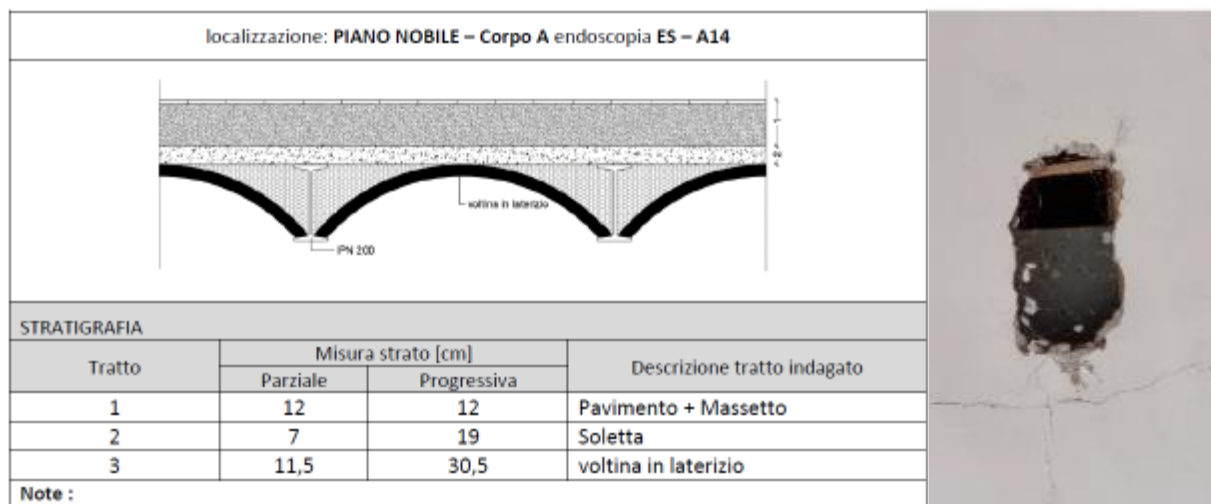


Figura 3.13 – Endoscopia e saggio locale sul solaio di calpestio del Piano Nobile sul lato orto botanico

Il solaio di copertura del piano Ammezzato è realizzato in latero-cemento con doppi travetti prefabbricati in c.a.p. e soletta superiore da 4 cm (Figura 3.14 e Figura 3.15).



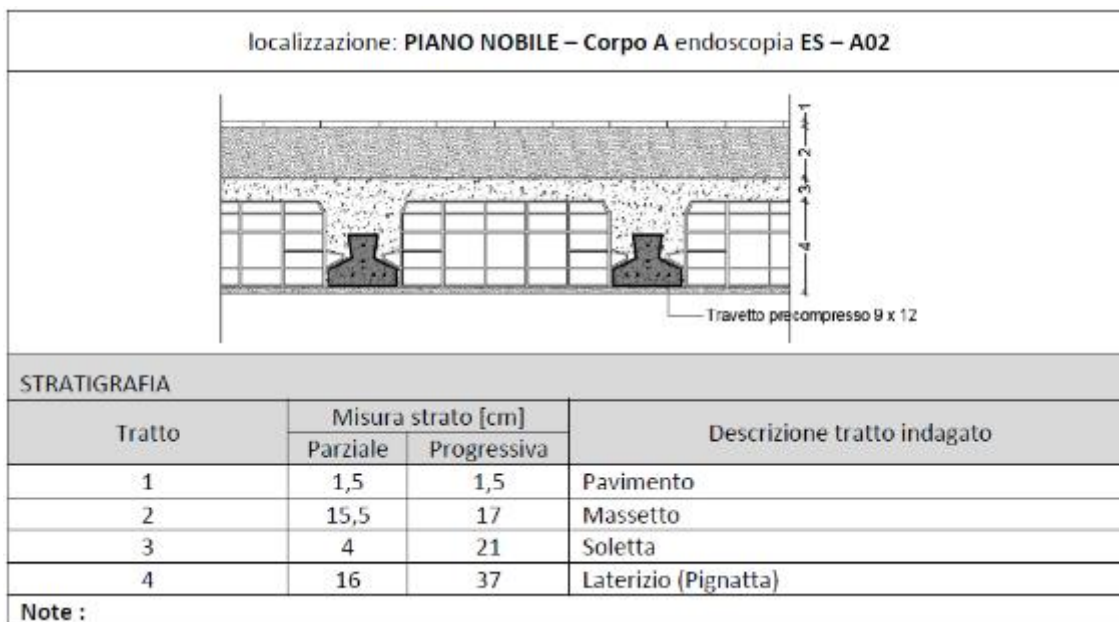


Figura 3.14 – Endoscopia sul solaio di copertura del piano Ammezzato



Figura 3.15 - Rimozione di intonaco all'intradosso del solaio di calpestio del Piano Nobile, dove sono ben visibili gli estradossi dei doppi travetti in c.a.p.

Il solaio di calpestio del piano Ammezzato è realizzato in latero-cemento con travetti prefabbricati a traliccio con fondello in laterizio (Figura 3.16 e Figura 3.17).

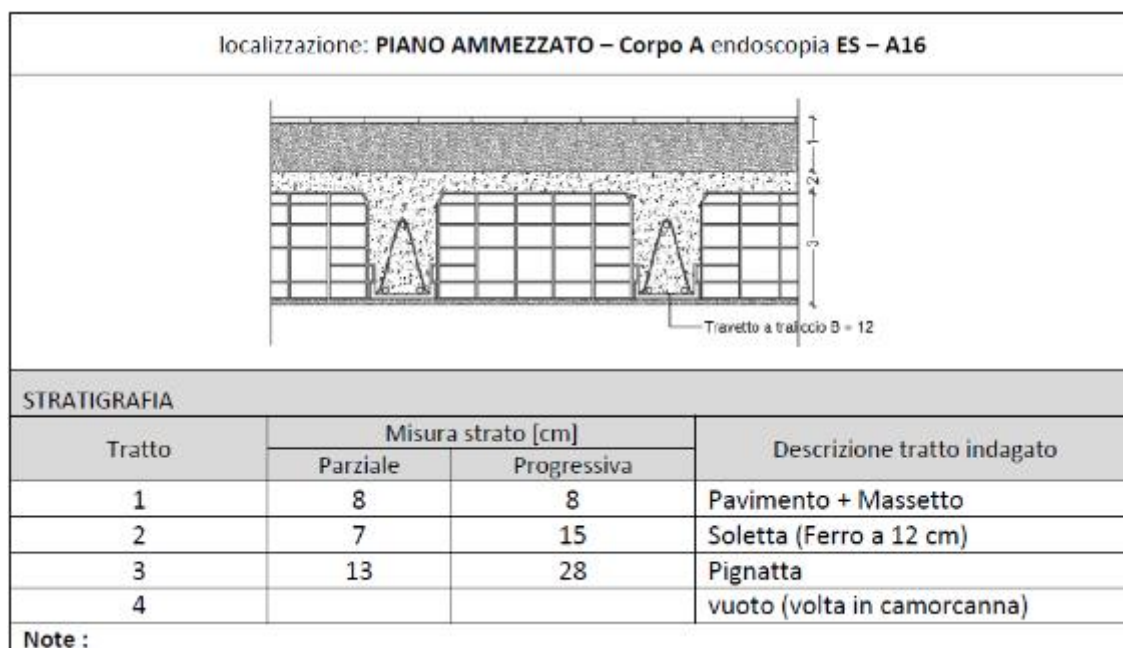


Figura 3.16 – Endoscopia sul solaio di calpestio del piano Ammezzato



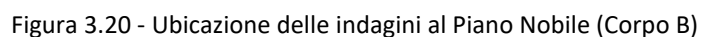
Figura 3.17 - Rimozione intonaco all'intradosso del solaio di calpestio del piano Ammezzato

### 3.2.3 Solai Corpo B

Nelle figure seguenti viene riportata l'ubicazione delle indagini sul Corpo B.



Figura 3.18 - Ubicazione delle indagini al Piano Strada (Corpo B)





Il solaio di copertura delle 3 volte presenti al Piano Strada presenta la stratigrafia descritta in Figura 3.21, con il rinfiacco degli archi delle volte realizzato in materiale alleggerito, una soletta superiore armata di 5 cm, ed un massetto di completamento di 10 cm, comprensivo della pavimentazione.

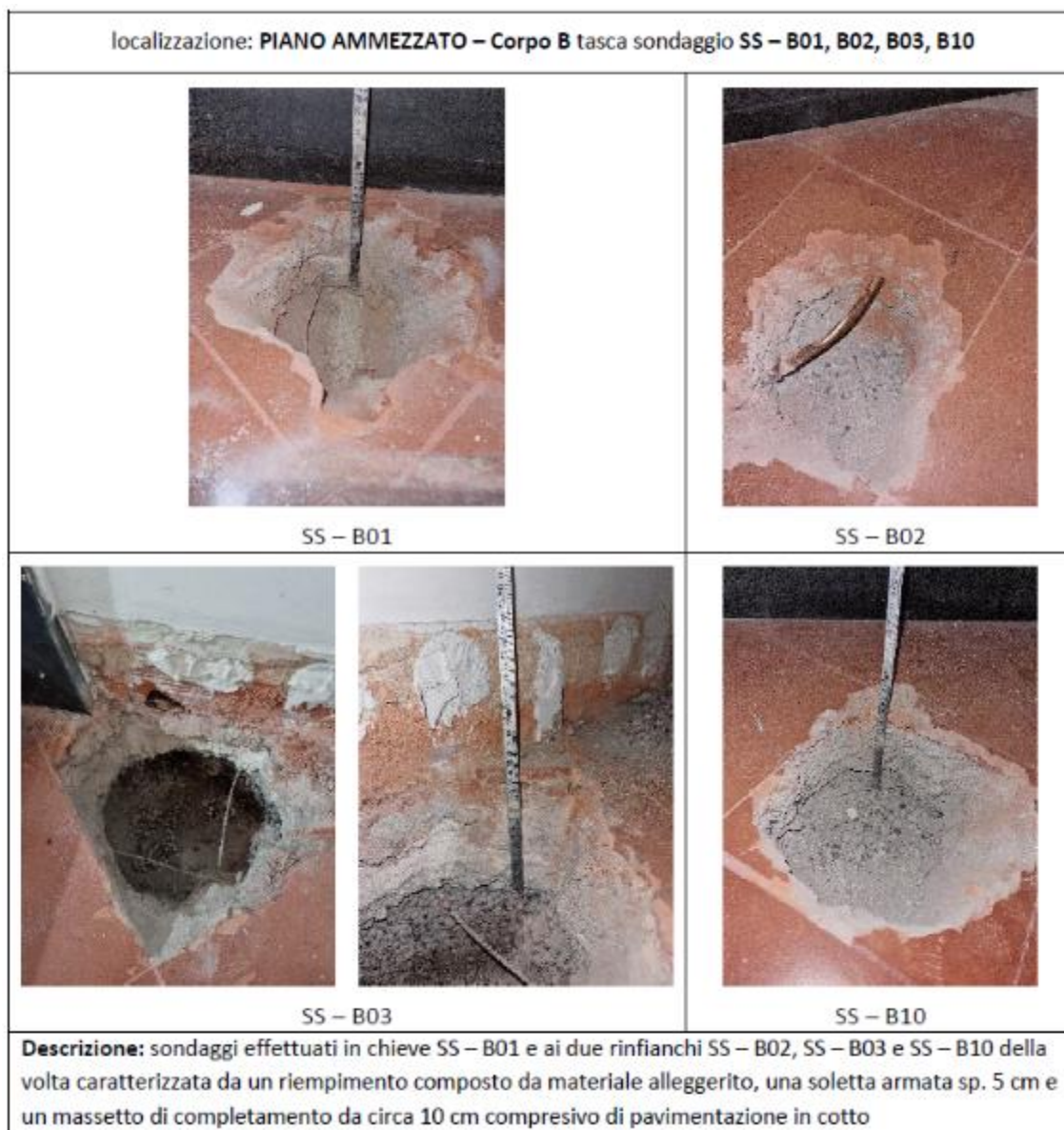


Figura 3.21 - Rimozione della pavimentazione all'estradosso delle volte a botte di copertura del Piano Strada

Il piano di calpestio del Piano Nobile del Corpo B risulta realizzato mediante un solaio in latero-cemento con travetti a traliccio prefabbricati, con 6 cm di soletta armata con rete elettrosaldata di maglia 18x18 cm, 10 cm di massetto più la pavimentazione.

localizzazione: **PIANO NOBILE – Corpo B** tasca sondaggio **SS – B01**



**Descrizione** : sondaggio solaio – solaio latero cemento con travetti a traliccio, spessore pacchetto 16 cm di cui 6 cm di soletta armata e 10 massetto + pavimento in cotto – la rete elettrosaldata ha una magli di circa 18 cm

Figura 3.22 - Rimozione della pavimentazione all'estradosso del solaio del Piano Nobile del Corpo B

### 3.2.4 Solai Corpo C

Nelle figure seguenti viene riportata l'ubicazione delle indagini sul Corpo B.



Figura 3.23 - Ubicazione delle indagini al Piano Strada (Corpo C)

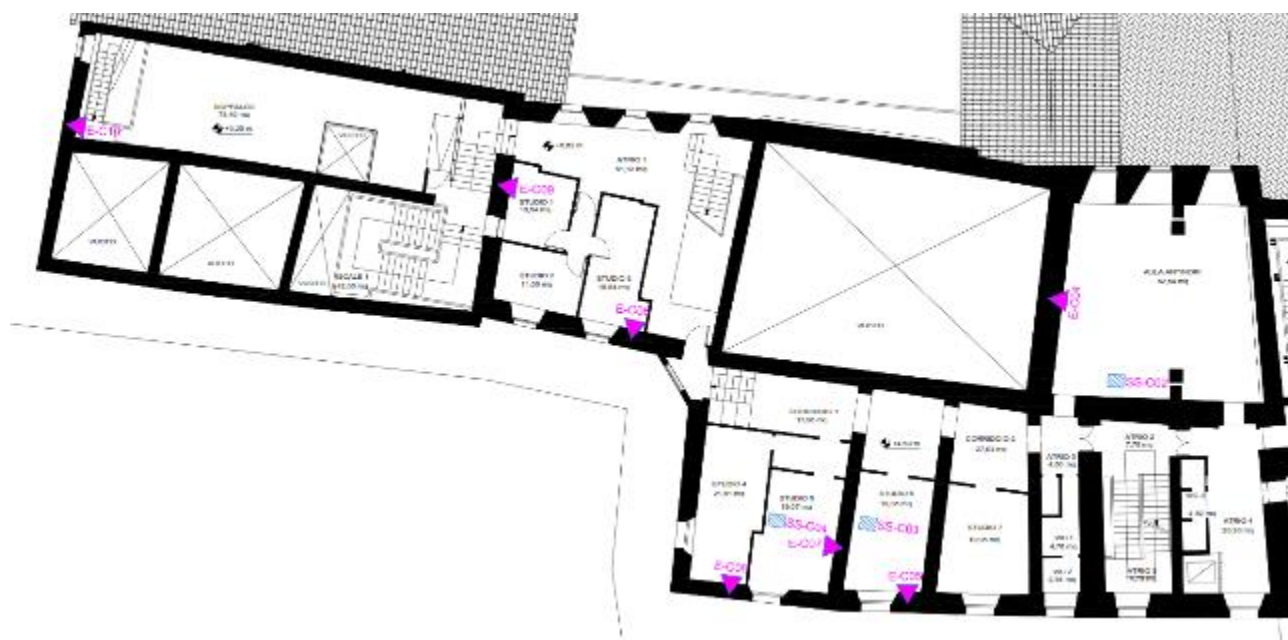


Figura 3.24 - Ubicazione delle indagini al Piano Ammezzato (Corpo C)



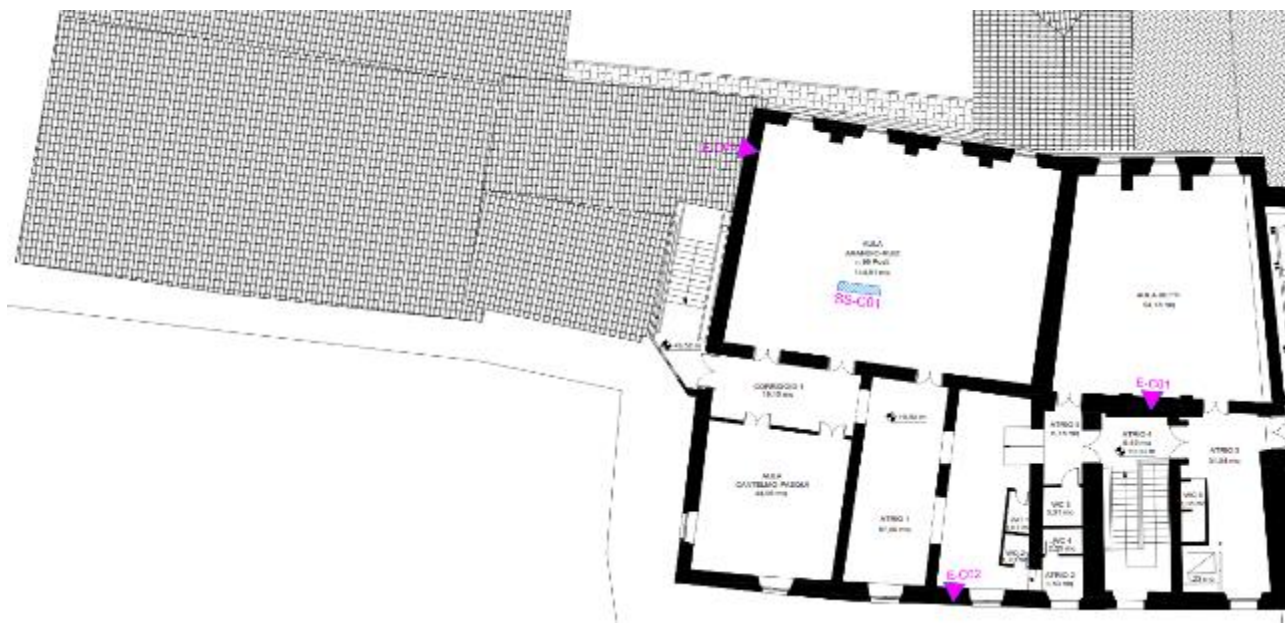


Figura 3.25 - Ubicazione delle indagini al Piano Nobile (Corpo C)

Il saggio locale eseguito all'estradosso del solaio dell'aula Arancio-Ruiz (solaio di calpestio nel Piano Nobile del Corpo C) mostra un solaio in travi di acciaio e tavelloni, come mostrato in Fig. 3.26, caratterizzato dall'assenza di una soletta armata al di sopra delle travi.



Fig. 3.26 - Rimozione locale della pavimentazione in corrispondenza dell'Aula Arancio-Ruiz al Piano Nobile del Corpo C



### 3.3 Martinetti piatti doppi

I martinetti piatti in configurazione doppia permettono, mediante l'incremento graduale della pressione e la contemporanea misurazione della deformazione della muratura compresa tra i martinetti, di ottenere informazioni in merito alle proprietà elastiche della muratura: in particolare è possibile stimare la curva tensione normale verticale-deformazione, il modulo di Poisson e la resistenza a compressione della muratura.

La prova è stata eseguita al piano Strada, in corrispondenza di due pannelli murari del Corpo A, uno del Corpo B ed uno del Corpo C.

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi sforzo-deformazione dei quattro pannelli murari testati, mentre in Figura 3.27 viene riportata la configurazione di riferimento dei martinetti e dei punti di lettura.

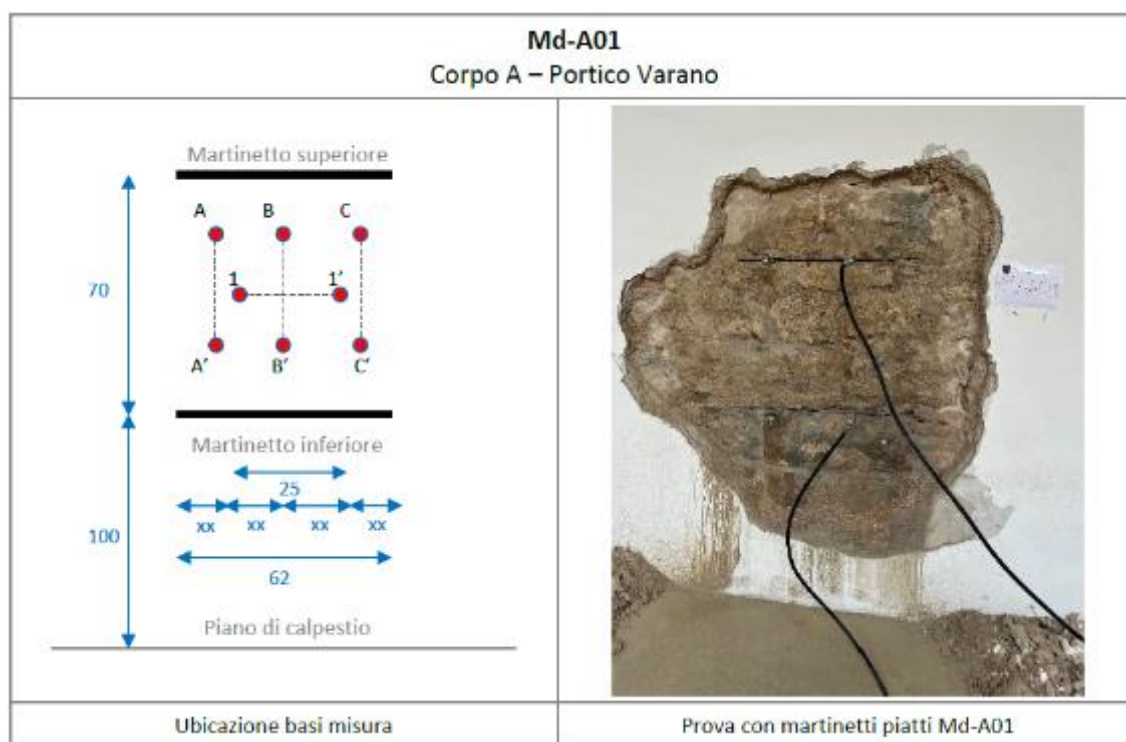
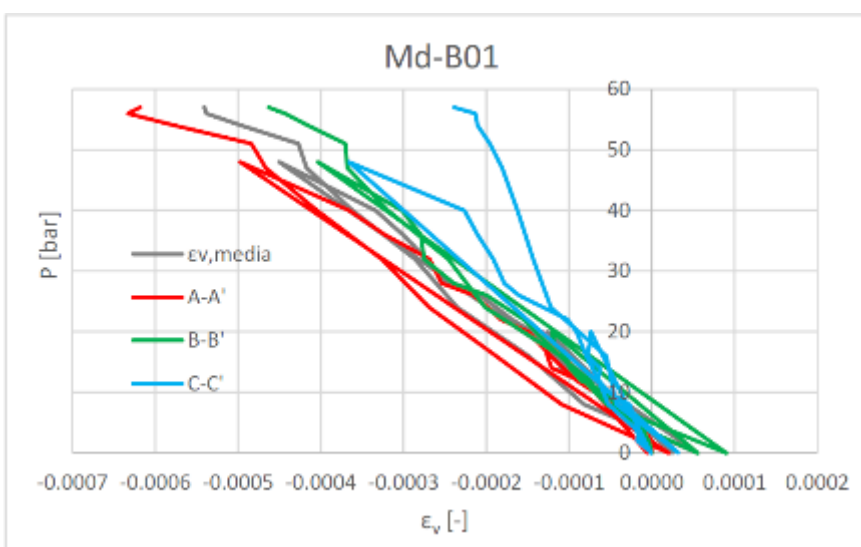
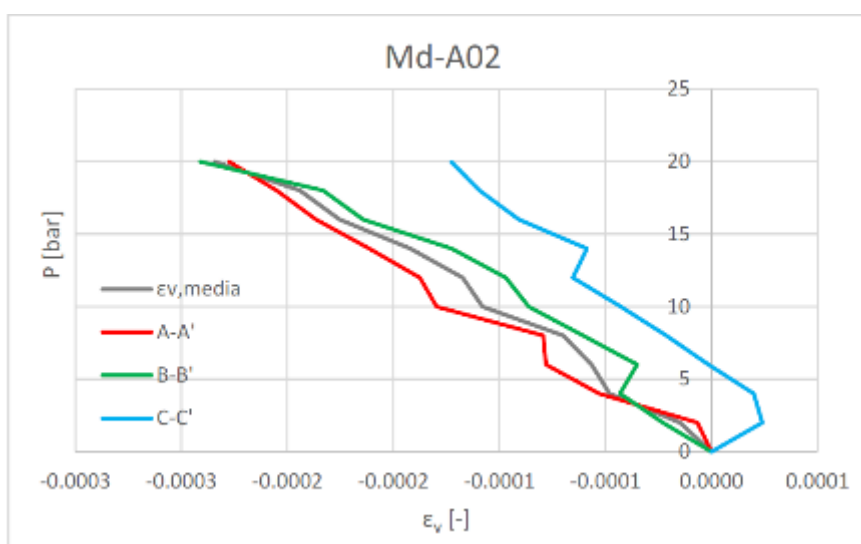
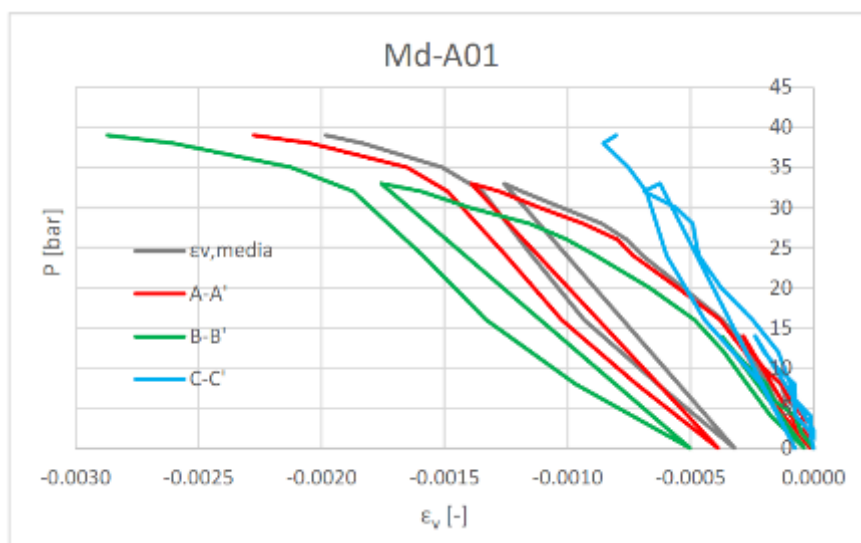


Figura 3.27 - Configurazione della prova tipo



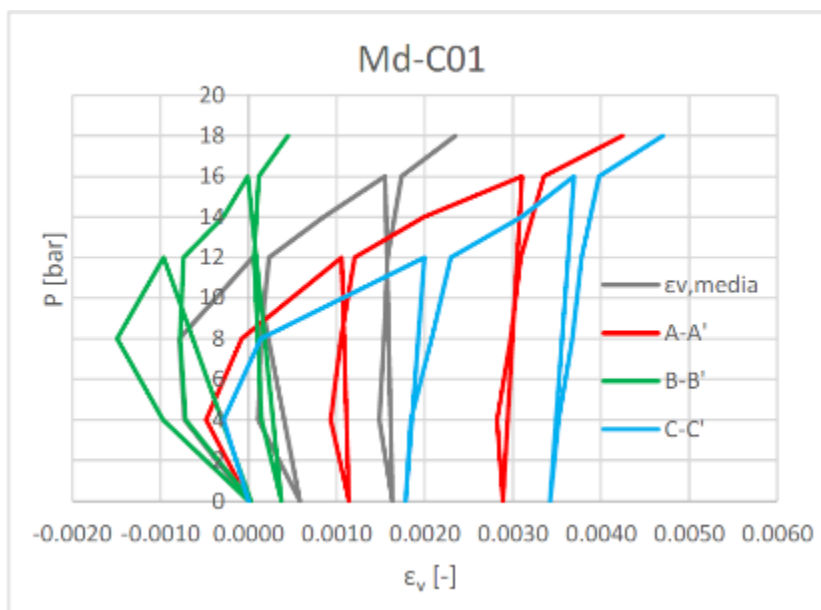


Figura 3.28 - Diagrammi sforzo-deformazione delle quattro prove eseguite

La prova Md-C01 mostra, all'aumentare della pressione applicata, un allontanamento dei punti di misura (allungamento), che può essere dovuto a diversi fattori, quali:

- Il pannello è caricato dal solo peso proprio e, una volta superato il livello tensionale ad esso collegato, viene meno il contrasto della muratura;
- La muratura, fortemente irregolare, fa sì che i martinetti facciano perno solo su alcuni elementi lapidei puntuali che, in assenza di contrasto portano alla rotazione del pannello ed all'apertura dello stesso.

Di conseguenza, in Tabella 3.1, vengono riportati i valori della rigidità tangente all'origine  $E_0$  e secante  $E_s$  definiti per le tre prove dal comportamento regolare.

Prova	$E_0$ (MPa)	$E_s$ (MPa)
Md-A01	8751	1907
Md-A02	12481	7859
Md-B01	32499	9885

Tabella 3.1 - Moduli elastici stimati dalla prova con martinetti piatti

### 3.4 Caratterizzazione meccanica delle arenarie delle colonne del Quadriportico

Lo studio sedimentologico, effettuato dallo Spin-OFF Geomore dell'Università di Camerino, ha permesso di caratterizzare il materiale di cui sono composte le colonne come un'arenaria locale, risalente alla Formazione di Camerino, nota da tempo per la sua particolare soggezione a fenomeni di alterazione ed erosione superficiale.

Sulle stesse colonne sono state inoltre eseguite prove ultrasoniche, con lo scopo di identificare qualitativamente la presenza o meno di discontinuità interne agli elementi lapidei che le compongono, legate a piani di frattura o a disomogeneità intrinseche del materiale.

Le indagini ultrasoniche, eseguite nelle due direzioni ortogonali, in una sezione in prossimità della base e a metà altezza, hanno permesso di giungere alla conclusione che, la maggior parte delle colonne presentano un elevato livello di degrado nelle sezioni di base ed un livello moderato di degrado nelle sezioni di metà altezza. Per quanto riguarda la presenza di eventuali discontinuità, 5 delle colonne indagate presentano alla base una riduzione della velocità di propagazione degli ultrasuoni (in una direzione rispetto all'altra) tale da fare pensare alla presenza di disomogeneità nel materiale lapideo, mentre tale riduzione risulta evidente solo in due delle colonne, nella sezione di mezzeria.

In Figura 3.29 e Figura 3.30 viene riportato il confronto della velocità degli ultrasuoni nelle due direzioni per le due sezioni di una delle colonne indagate. Si nota la forte riduzione della velocità degli ultrasuoni (in una direzione rispetto all'altra) nella sezione di base, imputabile alla presenza di discontinuità nel materiale; tale riduzione risulta di entità inferiore per la sezione di metà altezza della colonna, dove questa può essere imputata invece al solo degrado superficiale.

Colonna n. 10 - sez Base q. = 60 cm			
	d [cm]	t [μs.]	V [m/s]
C10-1721	57.9	462.80	1251.08
C10-1923	57.9	176.12	3287.53

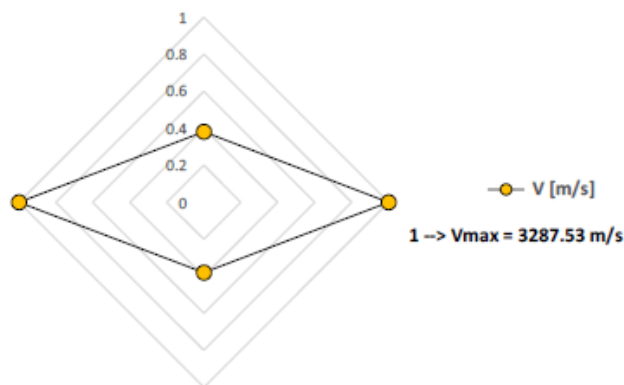


Figura 3.29 - Velocità degli ultrasuoni nella sezione di base di una colonna



Colonna n. 10 - sez Mezzeria q. = 224 cm			
	d [cm]	t [ $\mu$ s.]	V [m/s]
C10-0913	58.9	273.70	2151.99
C10-1115	59.2	211.02	2805.42

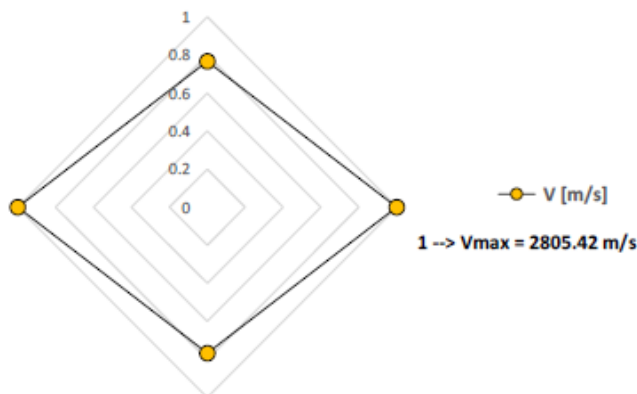


Figura 3.30 - Velocità degli ultrasuoni nella sezione di metà altezza della stessa colonna

Al fine di evitare danneggiamenti delle colonne del Quadriportico, le prove distruttive per la caratterizzazione meccanica delle arenarie di cui sono costituite le colonne, sono state eseguite su carote di arenaria estratte dal sottostante Orto Botanico, dove sono presenti affioramenti di strati di arenarie potenzialmente congruenti, in termini di natura e dimensione dei blocchi, con quelle costituenti il colonnato.

I risultati delle prove di schiacciamento dei provini di arenarie sono sintetizzati in Tabella 3.2, dove sono riportati anche i valori dell'indice di rimbalzo  $I$  e della velocità degli ultrasuoni  $V$  delle prove non distruttive eseguite sulle carote stesse, prima dello schiacciamento, per la messa a punto di una correlazione affidabile per la determinazione della resistenza a compressione di queste arenarie, nel caso vi fossero a disposizione solo le misure con Equotip (durezza superficiale) o ultrasoniche.

Come mostrato in Tabella 3.2, tranne che per alcuni casi, le prove di schiacciamento indicano una resistenza a compressione superiore ai 30 MPa.

Id_e	Rc (MPa)	I (mean) (n)	V (mean) (m/s)
OB-1/1	17.53	587.6	2562.35
OB-1/2	16.81	548.4	2555.82
OB-2/1	17.22	635.3	3832.75
OB-2/2	33.36	586.4	3548.39
OB-3BIS/1	30.78	659	3478.55
OB-3BIS/2	36.49	648	3516.77
OB-3BIS/3	34.07	669.1	3589.44
OB-5/1	38.85	632.5	4004.38
OB-5/2	53.39	663.7	3971.38
OB-5/3	41.68	647.1	4071.06
OB-6/1	18.22	634	3897.04
OB-6/2	34.29	622.4	3778.11
OB-6/3	43.57	595.1	3920.9
OB-7/1	32.01	672.4	3614.86
OB-8/1	31.27	673.6	3685.98
OB-8/2	41.63	645.3	3407.87

Tabella 3.2 - Risultati delle prove distruttive e non distruttive sulle carote di arenaria

### 3.5 Indagini radiografiche sulle colonne del Quadriportico

L'indagine radiografica si basa sull'interazione delle radiazioni ionizzanti con un corpo posto tra la sorgente emittente ed un ricevitore. Se nell'oggetto esaminato esistono difetti, cavità, fessure, grosse inclusioni o discontinuità più dense, come nel caso di ferri di armatura, sul ricevitore si formano macchie più scure o più chiare con intensità proporzionale allo spessore del difetto.

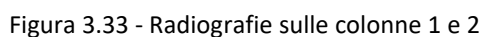
L'indagine radiografica è stata eseguita sulle colonne 1, 2, 3 e 5 (Figura 3.32).



Figura 3.31 - Il Quadriportico



L'obiettivo della prova è stato quello di valutare lo stato di conservazione delle barre di armatura inserite nelle colonne in interventi di manutenzione precedentemente eseguiti. Nello specifico la prova ha evidenziato nella quasi totalità delle aree indagate una buona omogeneità del materiale di composizione interna delle colonne con qualche leggera disgregazione superficiale (visibile anche dall'esterno).



Nella colonna 2 è stata rilevata la presenza diffusa di piccole cricche longitudinali e nella colonna 3 è stata rilevata una cricca di dimensioni più rilevanti. Internamente si è verificata la presenza di 6 ferri nella parte medio-bassa della colonna e 3 nella parte medio-alta. Nel complesso i ferri risultano ben conservati ma disposti in maniera differente nelle diverse colonne. L'unica anomalia riscontrata è relativa al basamento della colonna 5 dove, sebbene visivamente la colonna sia pendente verso il centro del portico, dalle radiografie non è visibile nessuna frattura in questo senso.

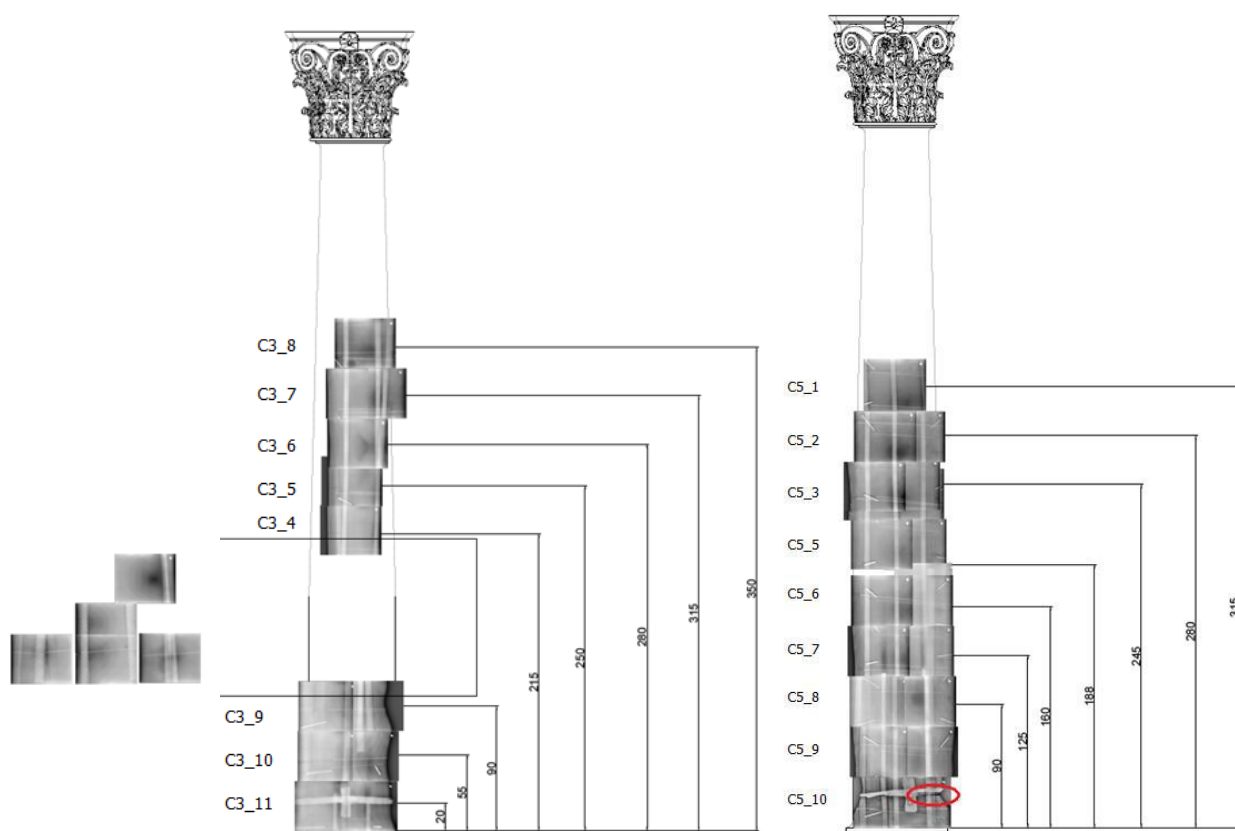


Figura 3.34 - Radiografie sulle colonne 3 e 5

Le colonne, come risulta dalla documentazione tecnica di contabilità reperita presso la Soprintendenza Archeologica, Belle Arti e Paesaggio delle Marche, sono state oggetto di un intervento con 3 barre di armatura alla base ammorsate nella fondazione e 3 barre sui fusti delle colonne (Figura 3.35). Il numero di barre rilevate con le radiografie risulta pertanto coerente con lo schema di figura.



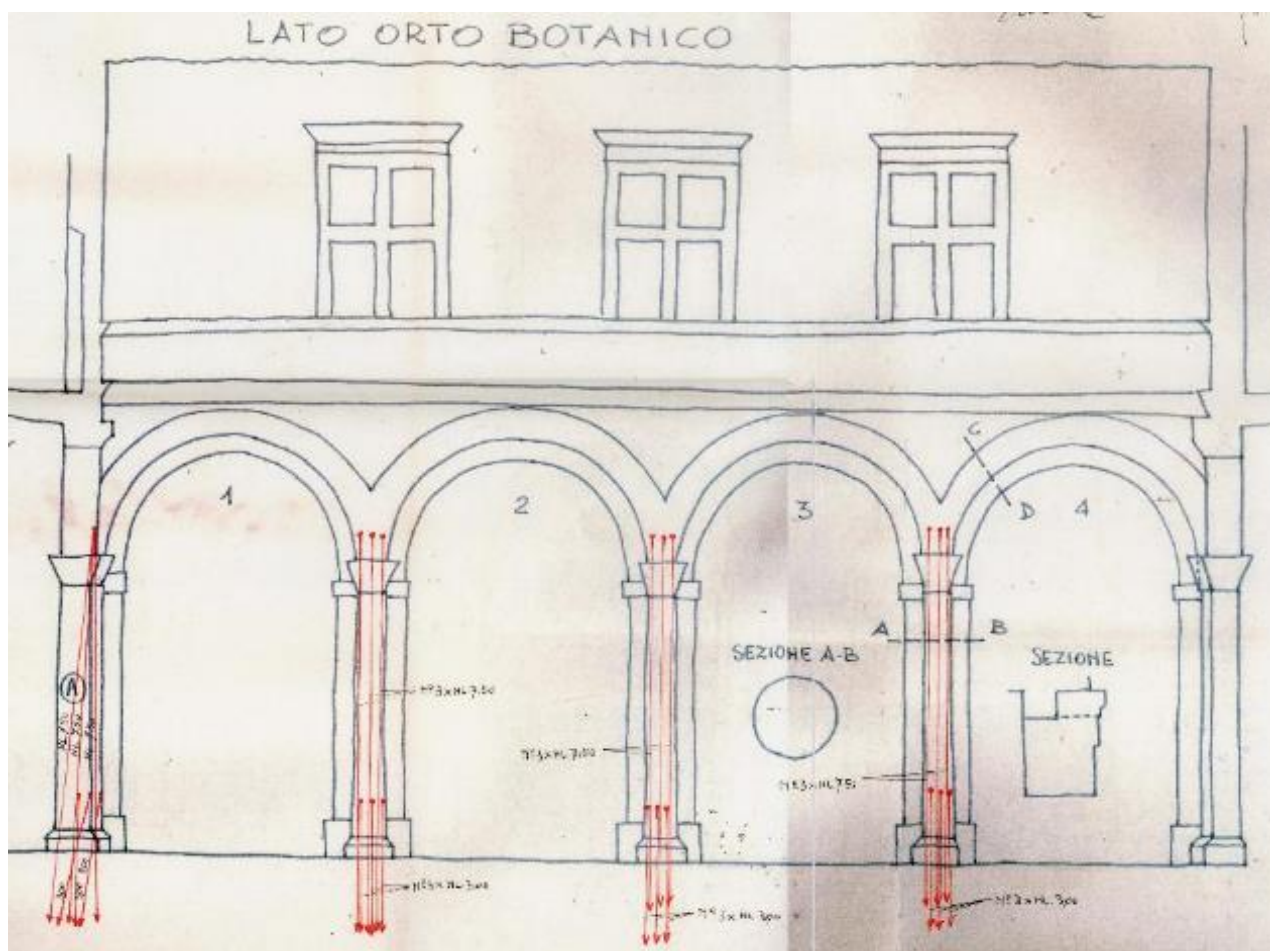


Figura 3.35 - Intervento di rinforzo delle colonne degli anni 70

### 3.6 Valutazione delle caratteristiche dinamiche e del tiro delle catene del Quadriportico

Sulle catene del Quadriportico è stata eseguita una campagna di identificazione delle frequenze proprie di vibrazione in direzione trasversale delle catene, volta alla successiva stima dello stato tensionale delle stesse.

Le catene indagate sono tutte quelle del Quadriportico, ad eccezione delle C04 e C10, di forma circolare e perciò non adatte all'installazione degli accelerometri, e delle catene dalla C05 alla C09, ritenute poco rappresentative poiché le volte in quella zona sono tutte in camorcanna.

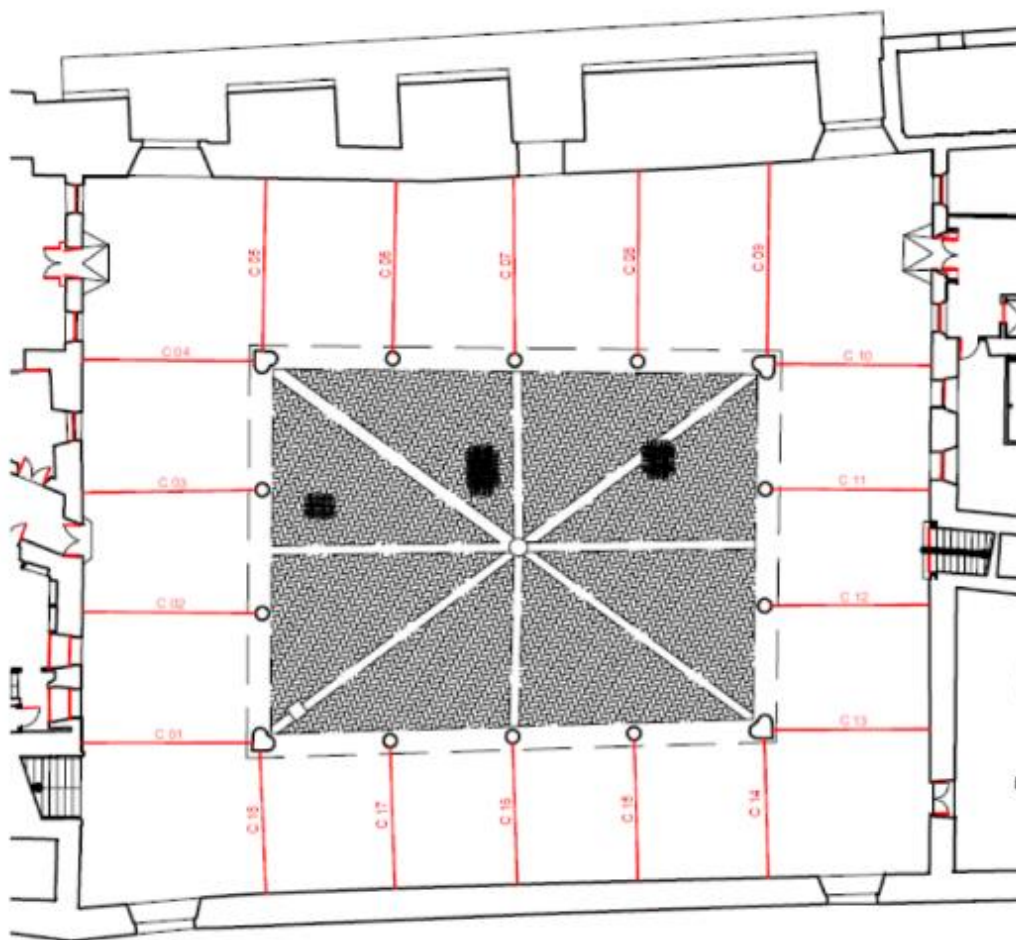


Figura 3.36 – Ubicazione catene indagate

L'identificazione delle prime tre frequenze di vibrazione trasversale ha quindi permesso, utilizzando la teoria della trave tesa, di calcolare un tiro medio sulle catene, il quale è stato poi confrontato con quello relativo alle frequenze identificate nel 2012 dall'Università di Parma.

In Tabella 3.3 viene riportata la sintesi dei valori di tiro identificati per le catene indagate.

CATENA	B/D	H	A	J	M	L	Tiri nuovi		Tiri vecchi		Variazione
							F <sub>medio</sub>	CV	F <sub>medio</sub>	CV	
	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	kg/m	m	kN	%	kN	%	%
1	35	25	875	4.56E+04	6.88	6.85	<b>3</b>	-	27	24%	
2	54	32	1728	1.47E+05	13.58	6.99	<b>180</b>	<b>2%</b>	181	2%	0%
3	56	33	1848	1.68E+05	14.53	7.13	<b>90</b>	<b>8%</b>	77	11%	16%
4	32	0	804	5.15E+04	6.32	6.62	-	-	68	5%	-
10	32	0	804	5.15E+04	6.32	7.17	-	-	53	27%	-
11	55	35	1925	1.97E+05	15.13	6.37	<b>151</b>	<b>2%</b>	139	1%	9%
12	54	35	1890	1.93E+05	14.86	6.33	<b>177</b>	<b>3%</b>	192	3%	-8%
13	57	35	1995	2.04E+05	15.68	6.23	<b>129</b>	<b>1%</b>	104	2%	25%
14	56	35	1960	2.00E+05	15.41	5.56	<b>262</b>	<b>1%</b>	248	1%	5%
15	55	35	1925	1.97E+05	15.13	5.8	<b>236</b>	<b>2%</b>	238	1%	-1%
16	56	35	1960	2.00E+05	15.41	5.76	<b>233</b>	<b>1%</b>	244	1%	-5%
17	55	33	1815	1.65E+05	14.27	5.6	<b>225</b>	<b>2%</b>	214	2%	5%
18	59	33	1947	1.77E+05	15.30	5.62	<b>290</b>	<b>1%</b>	286	6%	1%

Tabella 3.3 - Confronto dei valori dei tiri sulle catene

Dal confronto delle misure con i dati del 2012 si osserva un andamento non univoco delle variazioni, ma all'interno di un range abbastanza ristretto di -8% +25%.

### 3.7 Valutazioni sull'integrità della struttura muraria

La campagna di indagini ha fornito un quadro completo delle caratteristiche del fabbricato. Sono state individuate la geometria delle pareti e le tipologie delle murature e dei solai presenti nell'edificio. La valutazione delle caratteristiche della muratura è stata eseguita attraverso l'esame visivo di porzioni di pareti e con endoscopie ed attraverso prove con martinetti piatti doppi.

Non si ravvisano lesioni imputabili a fenomeni di cedimenti fondali del fabbricato.

Tenuto conto della completezza del rilievo eseguito e della estensione della campagna di indagini, è ragionevole ritenere di aver raggiunto il Livello di Conoscenza LC2 per il quale può essere assunto un fattore di confidenza **FC = 1,20**.

Con questo livello di conoscenza è possibile svolgere tutti i tipi di analisi e desumere le caratteristiche meccaniche della muratura dalle tabelle presenti in normativa.

### 3.8 Valutazione delle caratteristiche dei terreni

Per caratterizzare i terreni presenti nel sottosuolo è stata effettuata una ricerca documentale, riuscendo a reperire n° 11 sondaggi a carotaggio continuo (di cui 1 attrezzato per Down Hole), a cui sono state aggiunte n° 3 stazioni di misura HVSR.

Dall'individuazione di alcuni affioramenti del substrato, presenti all'interno del fabbricato ed evidenziati con il rilevamento geologico, e l'interpretazione delle indagini geognostiche reperite ha consentito di ricostruire l'assetto litostratigrafico locale senza dover eseguire ulteriori sondaggi o scavi geognostici.

Per la caratterizzazione geofisica è stata utilizzata la metodologia sismica, attraverso lo studio della propagazione delle onde elastiche; il risultato dell'indagine è dato dalla stima della velocità media di propagazione delle onde sismiche di taglio tra il piano campagna o la base di imposta delle fondazioni ed i successivi 30 metri di terreno ( $V_s 30$ ), oppure, qualora il bedrock sismico ( $V_s > 800 \text{ m/s}$ ) risulti a profondità inferiori a 30 metri, nello spessore di terreno compreso ( $V_{seq}$ ). Ciò è necessario per contribuire a definire, sulla base del D.M. 17 gennaio 2018, la categoria del suolo di fondazione da cui derivare parametri e coefficienti sismici da adottare nella progettazione strutturale.

Nel caso specifico è stata utilizzata la prova Down Hole realizzata per gli studi di microzonazione sismica di livello 3 redatti per conto dell'amministrazione comunale di Camerino. Tale prova è stata integrata da registrazioni del rumore sismico ambientale (indagine sismica passiva), detto anche microtremore, la cui elaborazione con la metodologia dei rapporti spettrali HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) consente anche di misurare la frequenza fondamentale del terreno.

Dall'elaborazione dei dati delle prove anzi dette e dalla loro interpolazione è stato costruito il modello sismostratigrafico sulla base del quale sono state valutate le  $V_s$  per ciascun sismostrato. Come si può vedere dal modello riportato in Figura 3.37, nell'ambito di uno stesso sismostrato si riscontrano delle differenze di velocità dovute al detensionamento dei litotipi per la prossimità al piano campagna o per lo stato di fratturazione ed alterazione; in particolare nella zona dell'Orto Botanico gli strati marnosi mostrano una velocità più bassa, in quanto prossimi al piano campagna, rispetto a quanto rilevato sulla verticale di Piazza Cavour dove sottostanno ad uno spessore di oltre 20 metri di arenarie.



Riguardo la definizione della categoria di suolo di fondazione secondo la formula 3.2.1 delle NTC, poiché le murature di fondazione poggiano direttamente sui litotipi del substrato, non è stato tenuto conto, rispetto ai profili delle velocità delle onde di taglio emerse dalle prove Down Hole e HVSR, dei primi 2-3 metri di terreno corrispondenti prevalentemente a riporti e/o colluvioni. Al di sotto di questi si rileva, per ulteriori 2-4 metri di spessore, il substrato alterato con velocità delle onde di taglio comprese tra 300 e 420 m/s per la zona dell'Orto Botanico e di 450 m/s per la zona di Piazza Cavour, e quindi la parte pressoché integra del substrato dove le velocità delle onde di taglio superano, anche se di poco, gli 800 m/s. All'interno della porzione integra si individuano, nondimeno, alcuni livelli di spessore medio di 5 metri che presentano velocità delle onde di taglio intorno a 500 m/s.

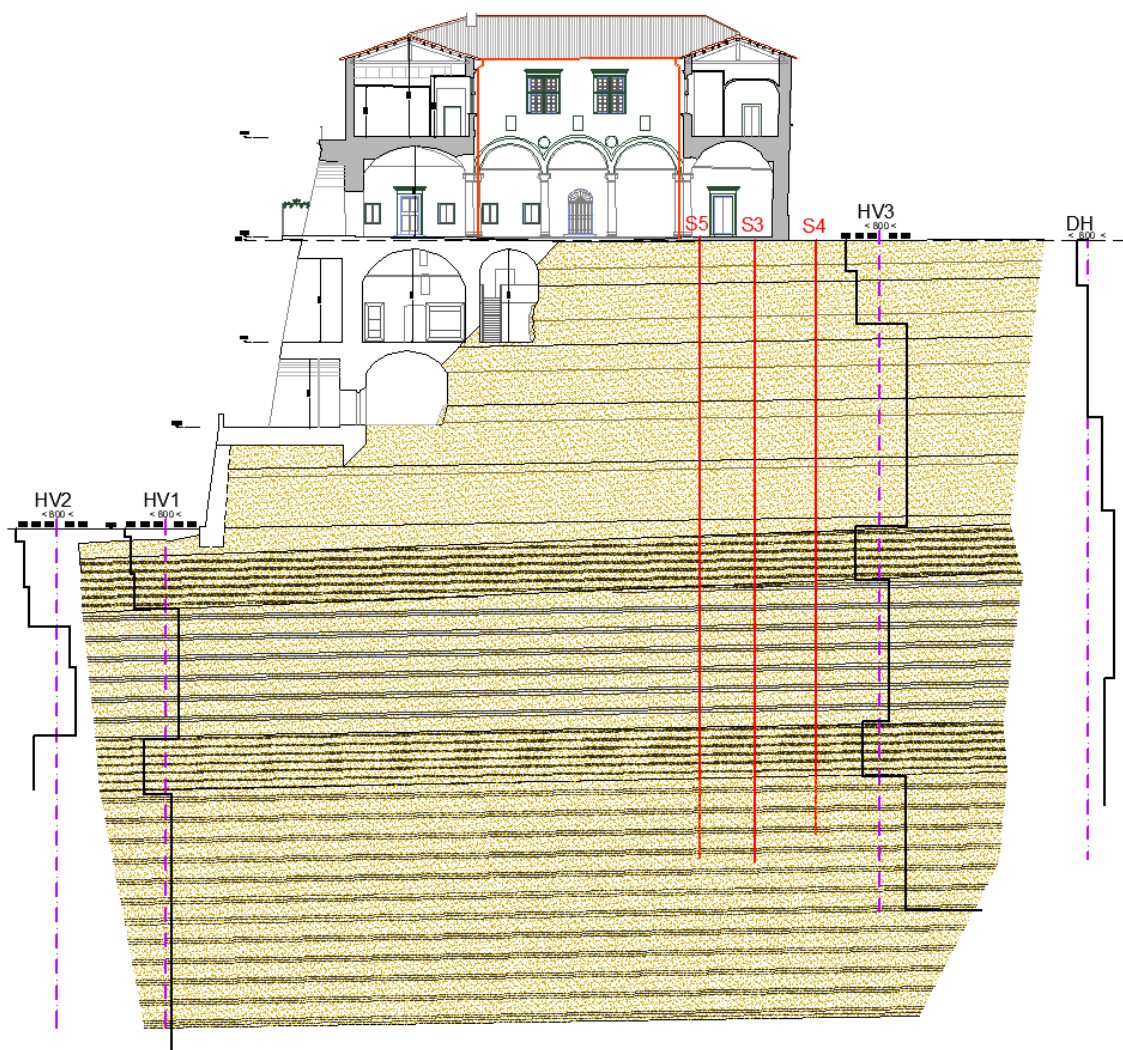


Figura 3.37 - Modello sismostratigrafico del terreno

L'oggettiva valutazione di queste inversioni di velocità ha indotto, in fase di analisi, a valutare una profondità del substrato sismico rispetto al piano delle fondazioni superiore a 40 metri; ciò ha portato a definire la velocità delle onde di taglio secondo il parametro  $V_{s,30}$ .

Nel caso particolare, nello spessore di terreno compreso tra la base fondale ed il substrato sismico si calcolano, applicando la formula 3.2.1 delle NTC ai dati di cui sopra, le seguenti velocità medie:

$$1) V_{seq} = 637 \text{ m/s}$$

$$2) V_{seq} = 716 \text{ m/s}$$

Dalle prove geofisiche eseguite si rilevano, quindi, dei differenti comportamenti del terreno alle sollecitazioni sismiche che tuttavia convergono, nella valutazione globale del sistema geologico, a definire un terreno di fondazione di **categoria B** (*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s*).

Dato che il complesso edilizio oggetto di intervento comprende una scarpata di altezza inferiore a 30 metri posta al culmine di un versante contraddistinto da una pendenza media inferiore a  $15^\circ$ , in base alla tabella 3.2.III del cap. 3.2 delle NTC la zona è ascrivibile alla categoria **T1** applicando, in riferimento alla tabella 3.2.V del cap. 3.2 delle NTC, un valore del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T = 1,0$ .

## 4 Interventi di ripristino e miglioramento sismico

In questo capitolo vengono descritti gli interventi previsti per il ripristino e miglioramento sismico del Palazzo Ducale Da Varano.

Come già fatto per la descrizione dei danni prodotti dal sisma, gli interventi proposti saranno illustrati suddividendo idealmente il palazzo in 3 differenti corpi:

- Corpo A, rappresentato dal Quadriportico, per il quale si prevedono una serie di interventi atti a migliorare il percorso delle azioni orizzontali dovute al sisma verso le due coppie di pareti perimetrali ortogonali del portico;
- Corpo B, rappresentato dal Corridoio della Facoltà di Giurisprudenza;
- Corpo C, rappresentato storicamente dall'affiancamento di diversi aggregati edilizi, per i quali si andranno ad eseguire interventi locali di ripristino degli elementi danneggiati e di miglioramento della tessitura muraria, nonché di collegamento dei due paramenti dei pannelli e l'ammorsamento delle pareti ortogonali, per migliorare il comportamento sismico globale del fabbricato e scongiurare la formazione di meccanismi di collasso locali.

In Figura 4.1 viene mostrata la suddivisione dei vari corpi.

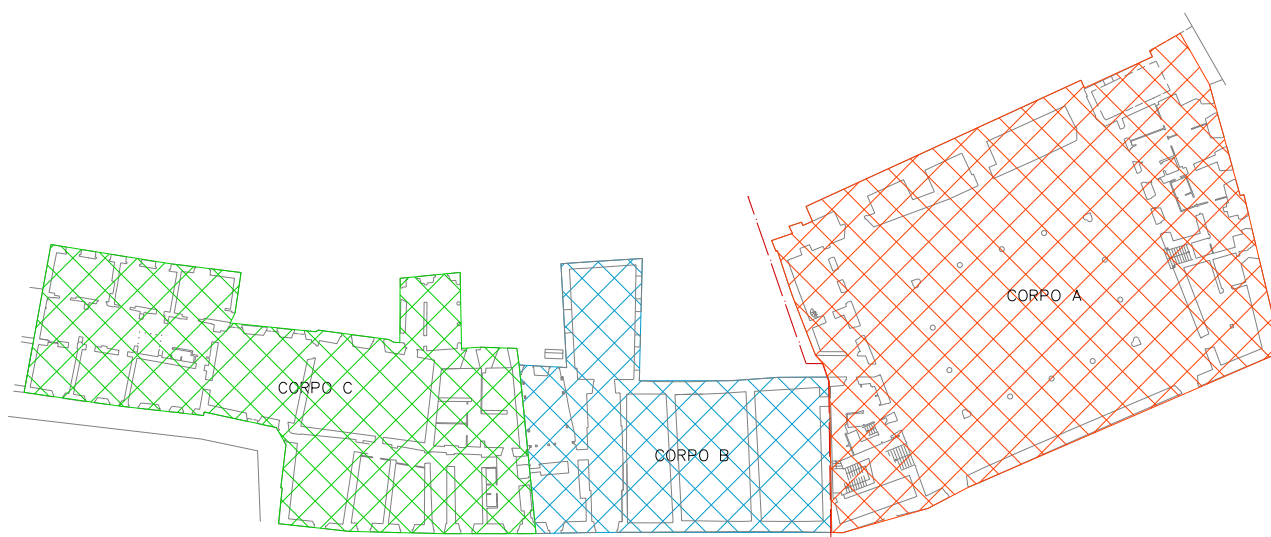



Figura 4.1 - Suddivisione del fabbricato per l'interpretazione del quadro fessurativo

	UNIVERSITA' DI CAMERINO	LAVORI DI RIPARAZIONE E MIGLIORAMENTO SIMICO DEL PALAZZO DUCALE DI CAMERINO	RELAZIONE TECNICA
--	----------------------------	--	-------------------

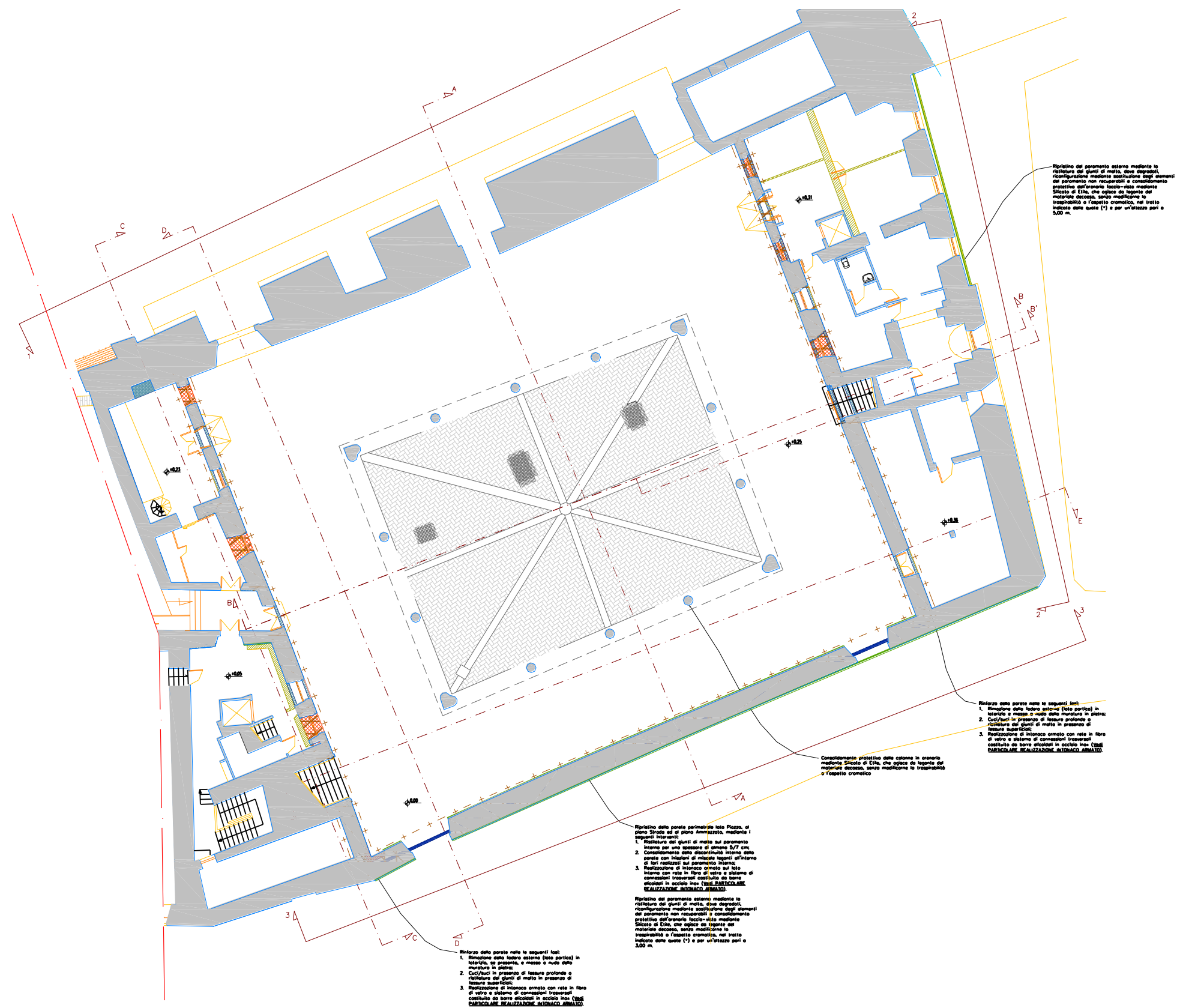
#### 4.1 Interventi sul Corpo A (Quadriportico)

Gli interventi previsti sul Corpo A hanno le seguenti finalità:










1. Miglioramento del percorso delle azioni orizzontali mediante:
  - i. Realizzazione di una soletta al piano di calpestio del piano Nobile di circa 6 cm per la realizzazione di un orizzontamento rigido;
  - ii. Realizzazione della continuità delle pareti interne del Quadriportico al piano Nobile;
  - iii. Realizzazione di un sistema di controvento sul piano di sottotetto con struttura metallica e pannelli in legno lamellare maschiati di spessore 80 mm;
2. Demolizione e ricostruzione della copertura con:
  - i. Consolidamento della porzione sommitale delle pareti mediante mattoni pieni e rete in fibra di vetro;
  - ii. Realizzazione di una copertura leggera con travi metalliche e pannelli in legno lamellare maschiati dello spessore di 80 mm.
3. Rinforzo delle pareti perimetrali del Quadriportico al piano Strada mediante chiusura di alcuni vani di finestra e realizzazione di intonaco armato con malta di calce e rete in fibra di vetro e cuciture trasversali con barre elicoidali in acciaio inox;
4. Ripristino degli elementi strutturali danneggiati e degradati, con interventi di cuci/scuci, ristilatura dei giunti, cerchiatura delle aperture e chiusura di nicchie;
5. Consolidamento statico delle colonne, mediante lo smontaggio e rimontaggio per la riduzione dell'eccentricità delle colonne maggiormente inclinate e mediante la cerchiatura di tutte le colonne con anelli metallici.

Gli interventi da eseguire sul Corpo A (Quadriportico) sono sintetizzati nelle figure che seguono.





LEGENDA INTERVENTI>>

-  Demolizione
-  Ripresa di lesioni e consolidamento di muratura sconnessa con:
  - sistema cuci/scuci eseguito con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure profonde;
  - ristilatura dei giunti di malta con malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure superficiali o di lieve entità
-  Chiusura di nicchie con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale con caratteristiche simili all'esistente
-  Realizzazione ammorsamento tra elementi non collegati o distaccati mediante cuci/scuci
-  Intonaco armato Sp. 3 cm con malta a base di calce idraulica naturale, rete preformata in fibra di vetro e sistema di connessione trasversale costituito da barre elicoidali in acciaio inox
-  Barre in acciaio inox di cucitura dei paramenti
-  Ristilatura dei giunti di malta, in presenza di lesioni leggere e comunque prima del consolidamento con iniezioni
-  Chiusura di apertura (porta/finestra) con muratura di mattoni adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Consolidamento della muratura mediante l'iniezione di miscele consolidanti

LEGENDA NUOVE REALIZZAZIONI>>

















-  Cerchiatura dell'apertura con telaio in profili metallici
-  Nuova parete in mattoni a 2 teste (Sp. strutturale 25 cm) adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Soletta in c.a. sp. 6 cm per la realizzazione di un orizzontamento rigido al piano di calpestio del Piano Nobile
-  Cordolo in mattoni pieni e fibra di vetro in copertura
-  Realizzazione nuovi elementi in cemento armato
-  Realizzazione di nuove catene, in affiancamento a quelle esistenti, dove queste ultime abbiano un pregio storico
-  Realizzazione nuovi architravi in legno sp. 20 cm adeguatamente ammorsati alla parete esistente (almeno il 40% per lato)

Figura 4.2 - Interventi al piano Strada: ripristini strutturali a cuci e scuci e chiusura di alcuni vani










Figura 4.3 - Interventi al piano Ammezzato

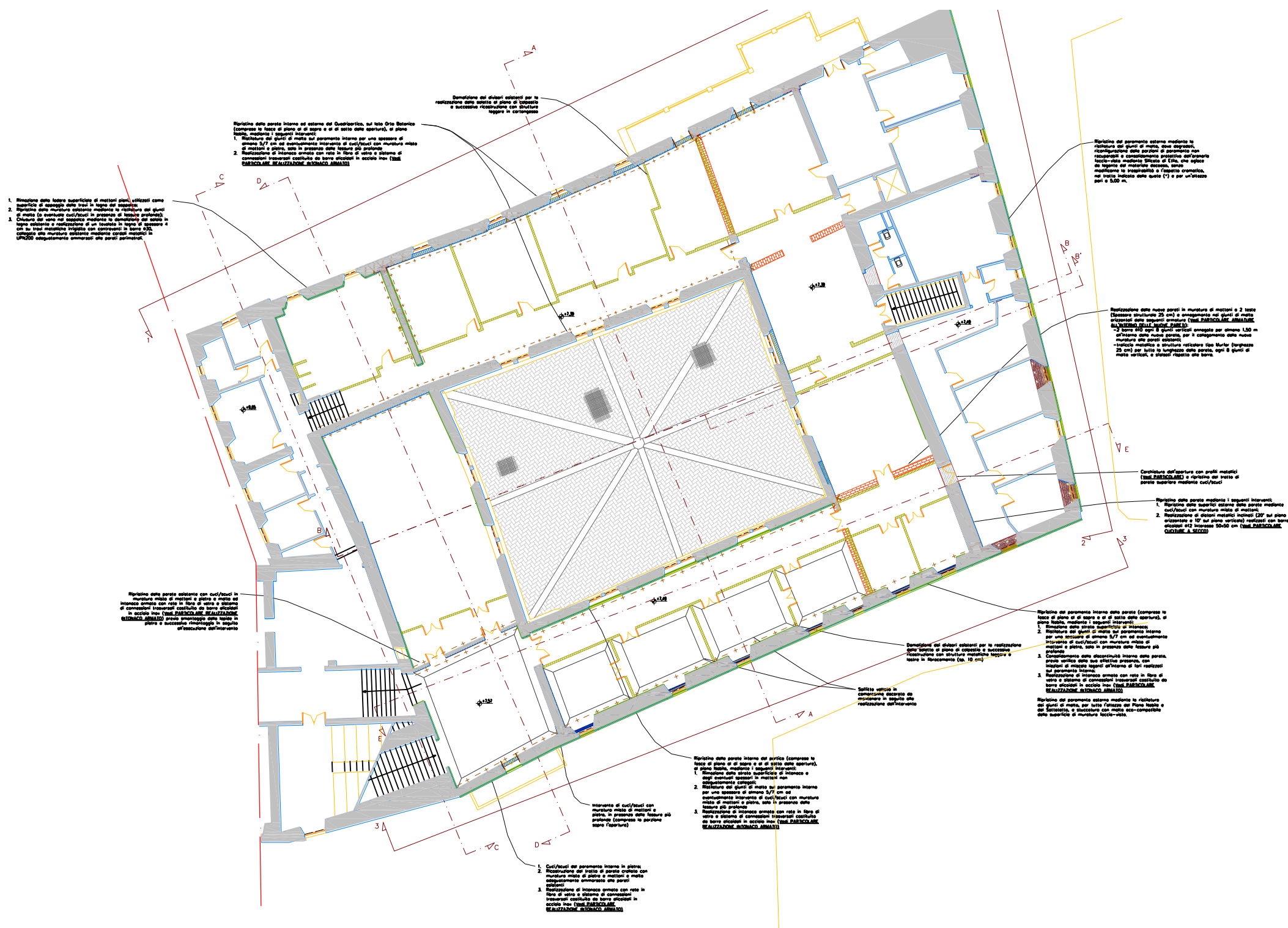
## LEGENDA INTERVENTI>>

-  Demolizione
-  Ripresa di lesioni e consolidamento di muratura sconnessa con:
  - sistema cuci/scuci eseguito con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure profonde;
  - ristituzione dei giunti di malta con malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure superficiali o di lieve entità
-  Chiusura di nicchie con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale con caratteristiche simili all'esistente
-  Realizzazione ammorsamento tra elementi non collegati o distaccati mediante cuci/scuci
-  Intonaco armato Sp. 3 cm con malta a base di calce idraulica naturale, rete preformata in fibra di vetro e sistema di connessione trasversale costituito da barre elicoidali in acciaio inox
-  Barre in acciaio inox di cucitura dei paramenti
-  Ristituzione dei giunti di malta, in presenza di lesioni leggere e comunque prima del consolidamento con iniezioni
-  Chiusura di apertura (porta/finestra) con muratura di mattoni adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Consolidamento della muratura mediante l'iniezione di miscele consolidanti










## LEGENDA NUOVE REALIZZAZIONI>>

-  Cerchiatura dell'apertura con telaio in profili metallici
-  Nuova parete in mattoni a 2 teste (Sp. strutturale 25 cm) adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Soletta in c.a. sp. 6 cm per la realizzazione di un orizzontamento rigido al piano di calpestio del Piano Nobile
-  Cordolo in mattoni pieni e fibra di vetro in copertura
-  Realizzazione nuovi elementi in cemento armato
-  Realizzazione di nuove catene, in affiancamento a quelle esistenti, dove queste ultime abbiano un pregio storico
-  Realizzazione nuovi architravi in legno sp. 20 cm adeguatamente ammorsati alla parete esistente (almeno il 40% per lato)





## LEGENDA INTERVENTI>>

-  Demolizione
-  Ripresa di lesioni e consolidamento di muratura sconnessa con:
  - sistema cuci/scuci eseguito con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure profonde;
  - ristilatura dei giunti di malta con malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure superficiali o di lieve entità
-  Chiusura di nicchie con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale con caratteristiche simili all'esistente
-  Realizzazione ammorsamento tra elementi non collegati o distaccati mediante cuci/scuci
-  Intonaco armato Sp. 3 cm con malta a base di calce idraulica naturale, rete preformata in fibra di vetro e sistema di connessione trasversale costituito da barre elicoidali in acciaio inox
-  Barre in acciaio inox di cucitura dei paramenti
-  Ristilatura dei giunti di malta, in presenza di lesioni leggere e comunque prima del consolidamento con iniezioni
-  Chiusura di apertura (porta/finestra) con muratura di mattoni adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Consolidamento della muratura mediante l'iniezione di miscele consolidanti

## LEGENDA NUOVE REALIZZAZIONI>>








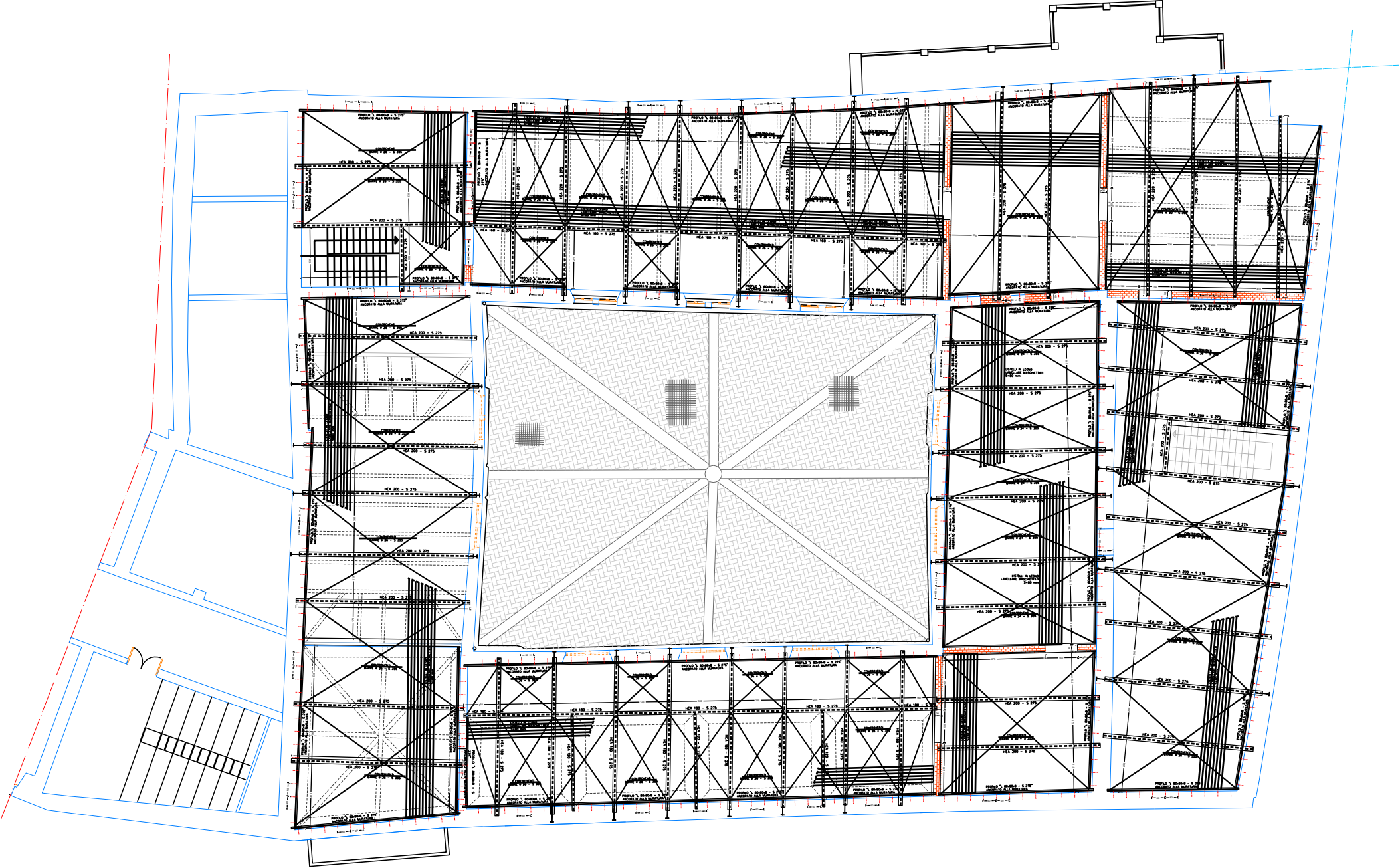









-  Cerchiatura dell'apertura con telaio in profili metallici
-  Nuova parete in mattoni a 2 teste (Sp. strutturale 25 cm) adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Soletta in c.a. sp. 6 cm per la realizzazione di un orizzontamento rigido al piano di calpestio del Piano Nobile
-  Cordolo in mattoni pieni e fibra di vetro in copertura
-  Realizzazione nuovi elementi in cemento armato
-  Realizzazione di nuove catene, in affiancamento a quelle esistenti, dove queste ultime abbiano un pregio storico
-  Realizzazione nuovi architravi in legno sp. 20 cm adeguatamente ammorsati alla parete esistente (almeno il 40% per lato)

Figura 4.4 - Interventi al piano Nobile: soletta in c.a. all'estradosso delle volte, inserimento di nuove pareti in muratura e divisori con struttura metallica reticolare



LEGENDA INTERVENTI>>

-  Demolizione
-  Ripresa di lesioni e consolidamento di muratura sconnessa con:
  - sistema cuci/scuci eseguito con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure profonde;
  - ristilatura dei giunti di malta con malta di calce idraulica naturale in presenza di fessure superficiali o di lieve entità
-  Chiusura di nicchie con muratura mista di pietrame o mattoni e malta di calce idraulica naturale con caratteristiche simili all'esistente
-  Realizzazione ammorsamento tra elementi non collegati o distaccati mediante cuci/scuci
-  Intonaco armato Sp. 3 cm con malta a base di calce idraulica naturale, rete preformata in fibra di vetro e sistema di connessione trasversale costituito da barre elicoidali in acciaio inox
-  Barre in acciaio inox di cucitura dei paramenti
-  Ristilatura dei giunti di malta, in presenza di lesioni leggere e comunque prima del consolidamento con iniezioni
-  Chiusura di apertura (porta/finestra) con muratura di mattoni adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Consolidamento della muratura mediante l'iniezione di miscele consolidanti

LEGENDA NUOVE REALIZZAZIONI>>








-  Cerchiatura dell'apertura con telaio in profili metallici
-  Nuova parete in mattoni a 2 teste (Sp. strutturale 25 cm) adeguatamente ammorsata alla muratura esistente
-  Soletta in c.a. sp. 6 cm per la realizzazione di un orizzontamento rigido al piano di calpestio del Piano Nobile
-  Cordolo in mattoni pieni e fibra di vetro in copertura
-  Realizzazione nuovi elementi in cemento armato
-  Realizzazione di nuove catene, in affiancamento a quelle esistenti, dove queste ultime abbiano un pregio storico
-  Realizzazione nuovi architravi in legno sp. 20 cm adeguatamente ammorsati alla parete esistente (almeno il 40% per lato)

Figura 4.5 - Interventi al piano Sottotetto: strutture reticolari metalliche di controvento



#### 4.1.1 Interventi di miglioramento del percorso delle azioni orizzontali

Gli interventi hanno per obiettivo il miglioramento dello schema strutturale che garantisce il trasferimento delle forze sismiche orizzontali, generate dalle masse del piano Nobile (solaio di calpestio e pareti in elevazione), del sottotetto e della copertura, alle quattro pareti perimetrali del piano strada del Quadriportico. Tutte le azioni orizzontali dovute al sisma, sono infatti trasferite a terra dalle due coppie di pareti indicate in Figura 4.6.

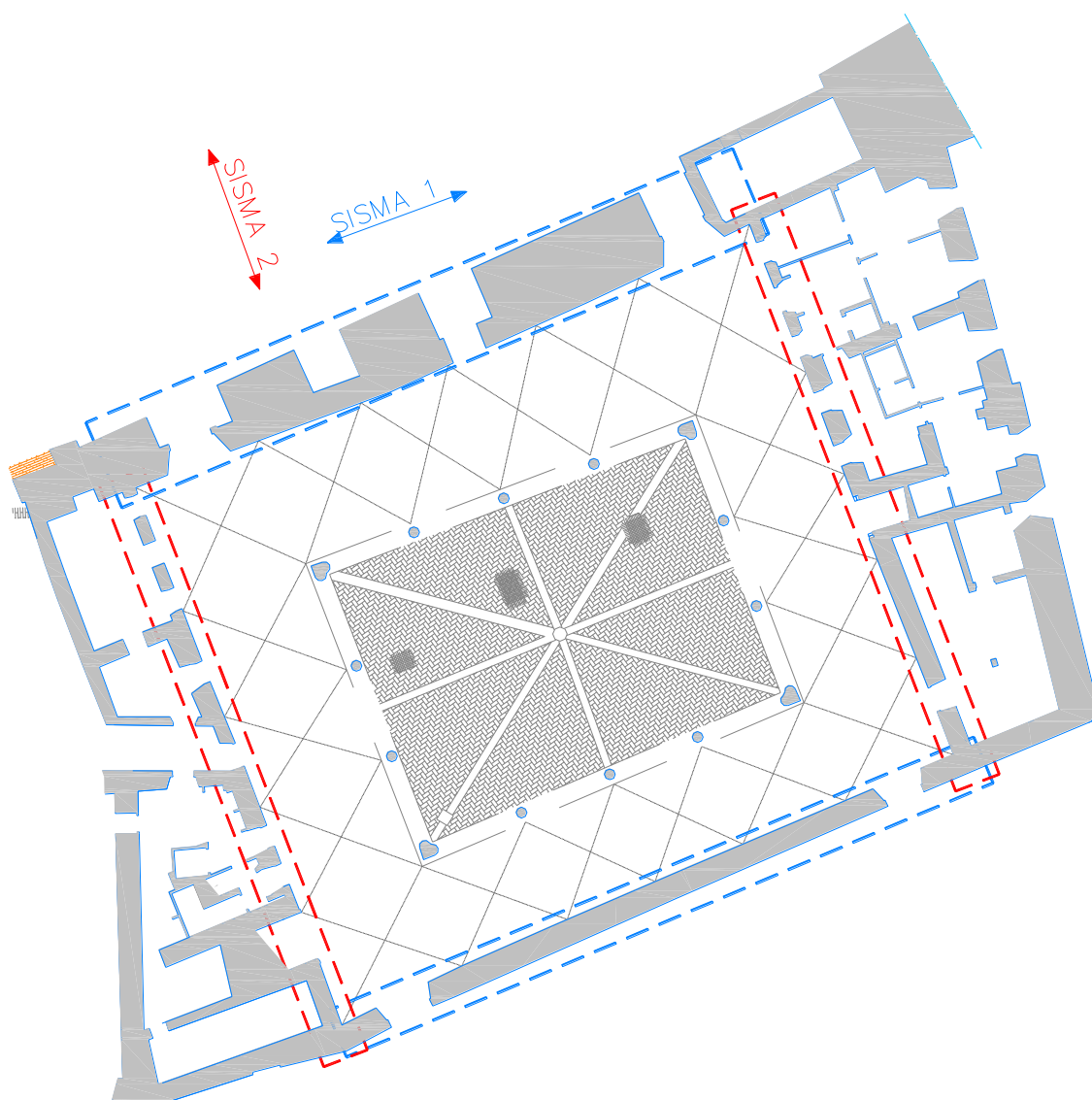


Figura 4.6 - Pannelli murari resistenti al piano Strada del Quadriportico: in blu, quelli resistenti al Sisma in direzione 1, e in rosso, quelli resistenti al Sisma in direzione 2

Gli interventi possono essere così sintetizzati:

1. Realizzazione di un orizzontamento sufficientemente rigido al livello del solaio di calpestio del piano Nobile, con soletta armata di 6 cm su tutta la superficie, previa demolizione dei divisori interni, pavimenti e massetti, come indicato dal retino in Figura 4.7;

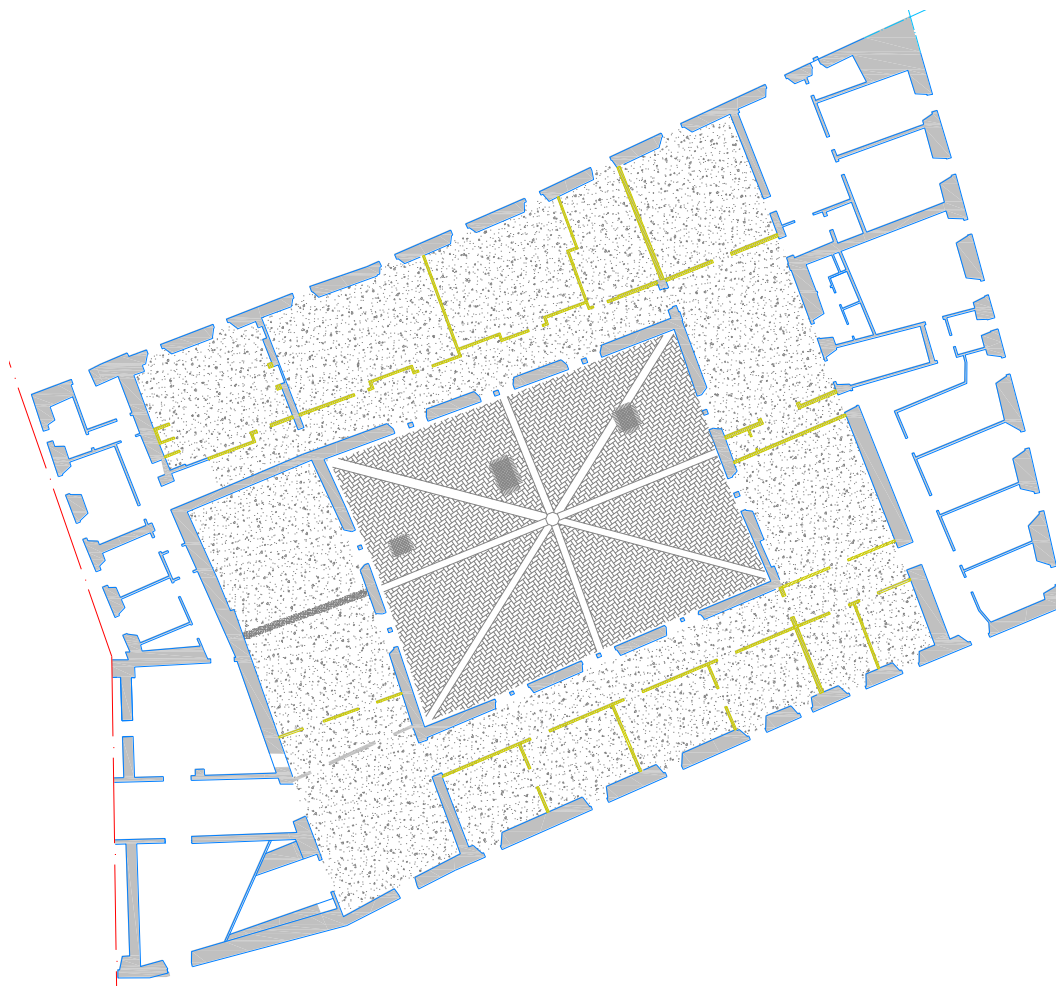


Figura 4.7 - Realizzazione di una soletta in c.a. di irrigidimento dell'orizzontamento del piano Nobile

2. Ricostituzione della continuità delle quattro pareti interne del Quadriportico al piano Nobile, in modo da creare un sistema strutturale resistente in grado di trasferire le azioni sismiche orizzontali al solaio del piano Nobile (Figura 4.8), mediante ripristino e rinforzo delle pareti danneggiate con interventi di cucì/scucì ed intonaco armato, e realizzazione di nuove pareti, in continuità con quelle esistenti (indicate in rosso nella Figura 4.8), portate fino in copertura. In questo modo si realizza lo schema resistente mostrato in Figura 4.9.

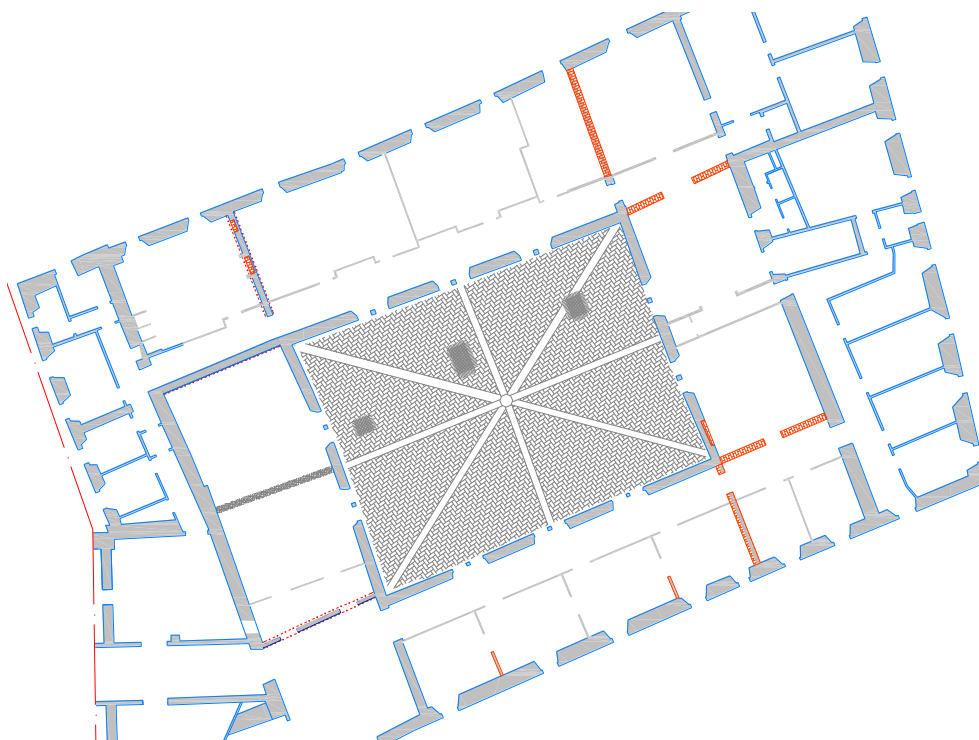


Figura 4.8 - Interventi di ripristino della continuità delle pareti perimetrali del Quadriportico al piano Nobile

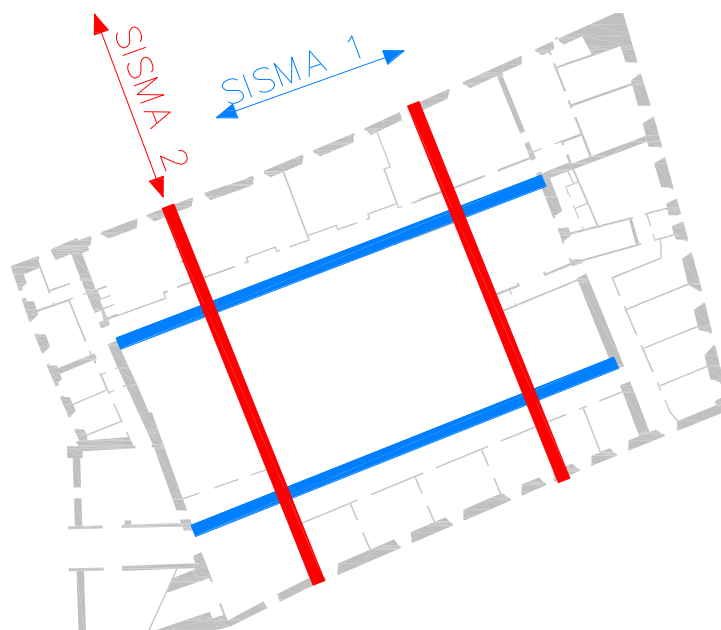


Figura 4.9 - Schema resistente realizzato con l'intervento in Figura 4.8

3. Irrigidimento del piano del Sottotetto, mediante la realizzazione di un solaio leggero controventato con travi metalliche e pianellato in legno lamellare maschiato di sp. 8 cm;  
In Figura 4.10 è mostrata la disposizione degli interventi al livello del Sottotetto.

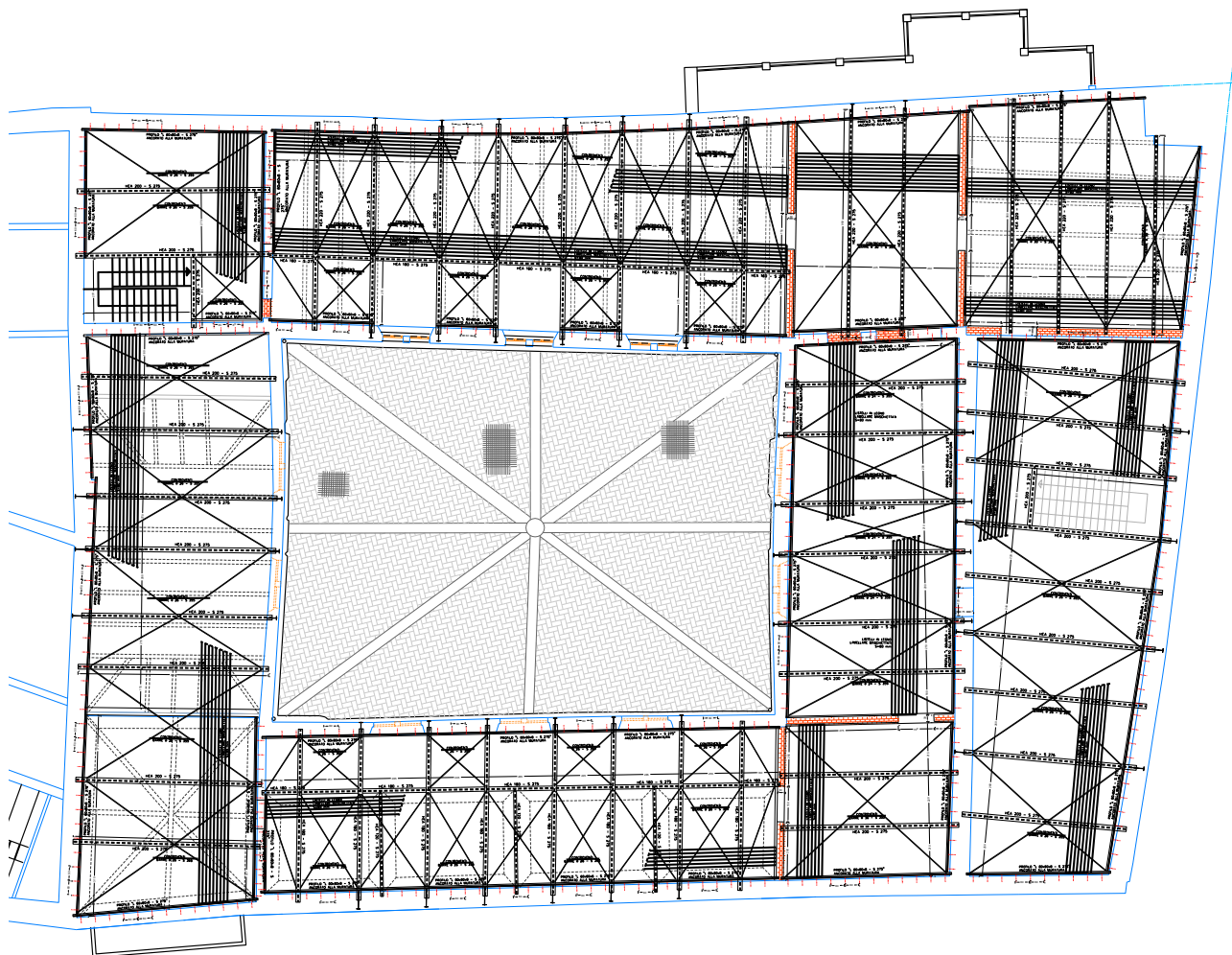


Figura 4.10 - Intervento di realizzazione di un orizzontamento semi-rigido al livello del Sottotetto

I suddetti interventi migliorano pertanto il percorso delle azioni sismiche orizzontali e il trasferimento delle stesse alle pareti perimetrali al piano Strada, secondo il flusso seguente:

1. Il sottotetto trasferisce le azioni orizzontali legate alla massa della copertura, del sottotetto ai muri perimetrali e nel contempo fornisce un vincolo antiribaltamento alle pareti sui lati est (Piazza) ed ovest (Orto Botanico);
2. La continuità dei pannelli murari realizzata al piano Nobile consente il trasferimento delle azioni orizzontali al solaio irrigidito del piano Nobile;
3. L'orizzontamento semi-rigido realizzato mediante la soletta in c.a. al piano Nobile trasmette correttamente le azioni orizzontali ai pannelli perimetrali del portico al piano Strada.



#### **4.1.2 Interventi di ricostruzione della copertura**

Gli interventi in copertura prevedono:

- Demolizione totale della copertura esistente;
- Consolidamento della porzione sommitale delle pareti mediante il rifacimento in muratura di mattoni pieni e rete in fibra di vetro, per un'altezza di 40-50 cm;
- Realizzazione di una copertura leggera con travi metalliche e pannelli in legno lamellare maschiati di spessore 80 mm;
- Realizzazione di un sistema di controventi di falda in piatti metallici adeguatamente saldati ad un piatto metallico perimetrale, collegato a sua volta alle pareti mediante barre  $\phi 14/40$  cm inghisate alla porzione sommitale di muratura.

Nelle figure seguenti vengono riportati alcuni particolari strutturali relativi alla copertura:

1. Travi metalliche sagomate utilizzate per i due corridoi lato Piazza e lato Orto Botanico (Figura 4.11);
2. Travi metalliche collegate al colmo utilizzate per i lati nord e sud del Quadriportico (Figura 4.12);
3. Collegamento delle travi metalliche di copertura con le pareti nella sezione di gronda (Figura 4.13);
4. Collegamento delle travi metalliche di copertura, di cui al punto 2, nella sezione di colmo (Figura 4.14).

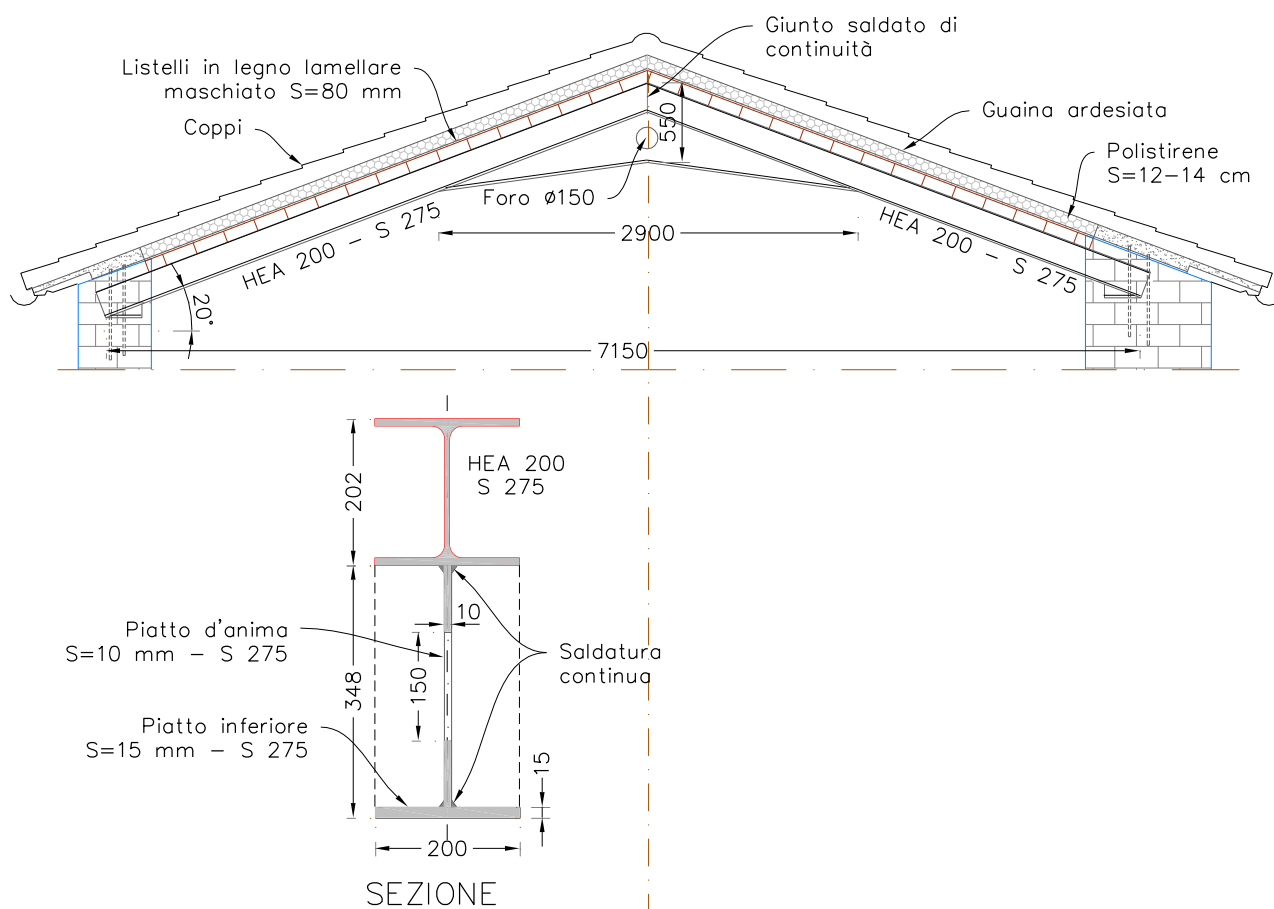


Figura 4.11 – Travi metalliche sagomate utilizzate per la copertura dei corridoi lato Piazza e Orto Botanico

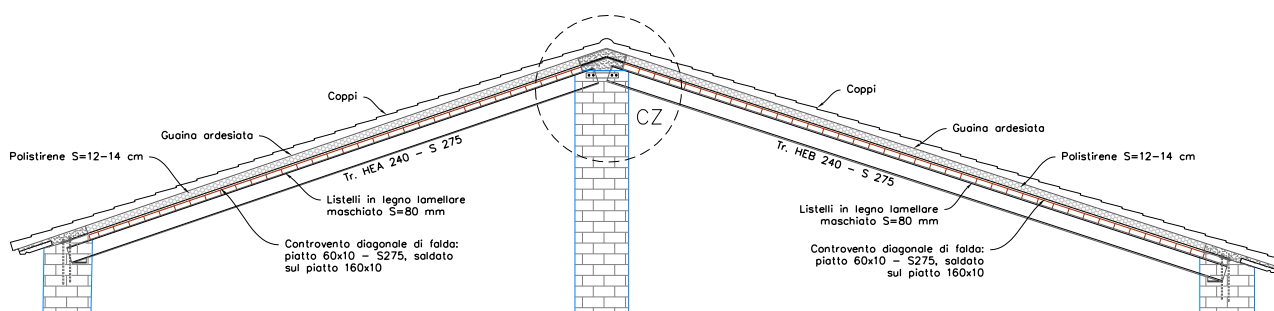


Figura 4.12 - Travi metalliche utilizzate per la copertura dei lati nord e sud

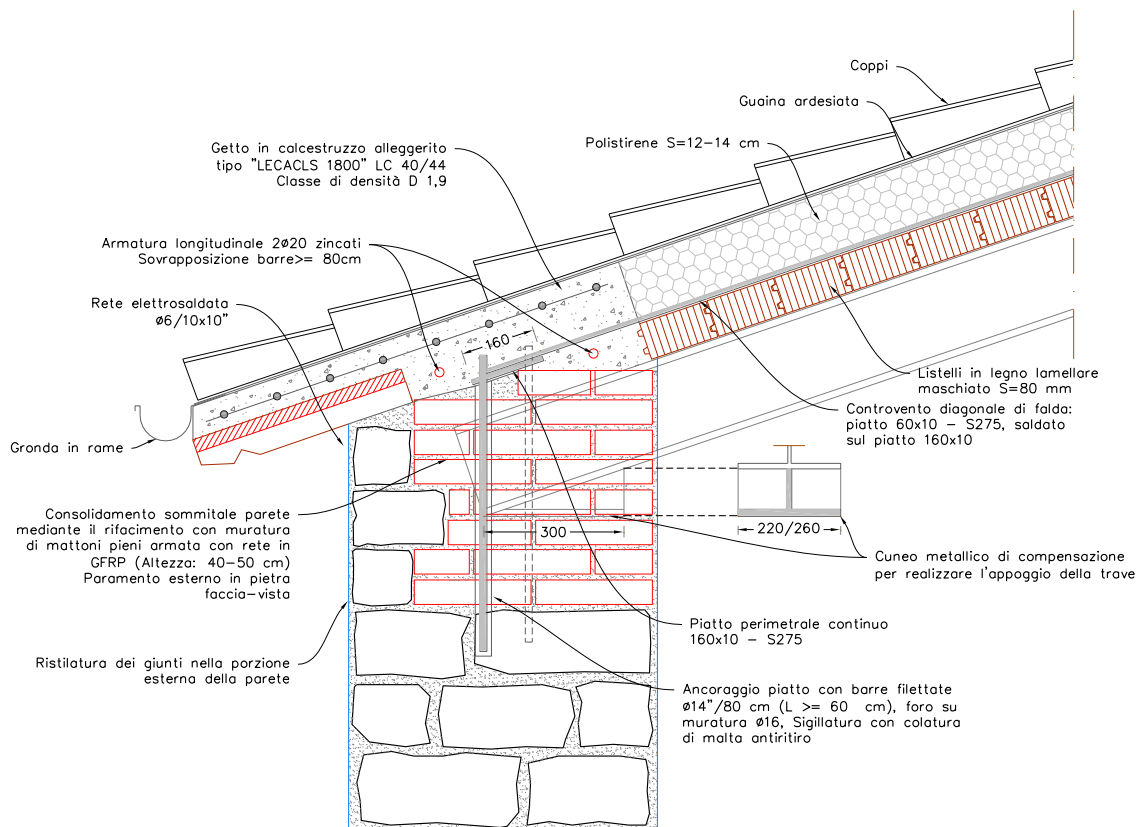


Figura 4.13 - Particolare collegamento della copertura ai muri perimetrali

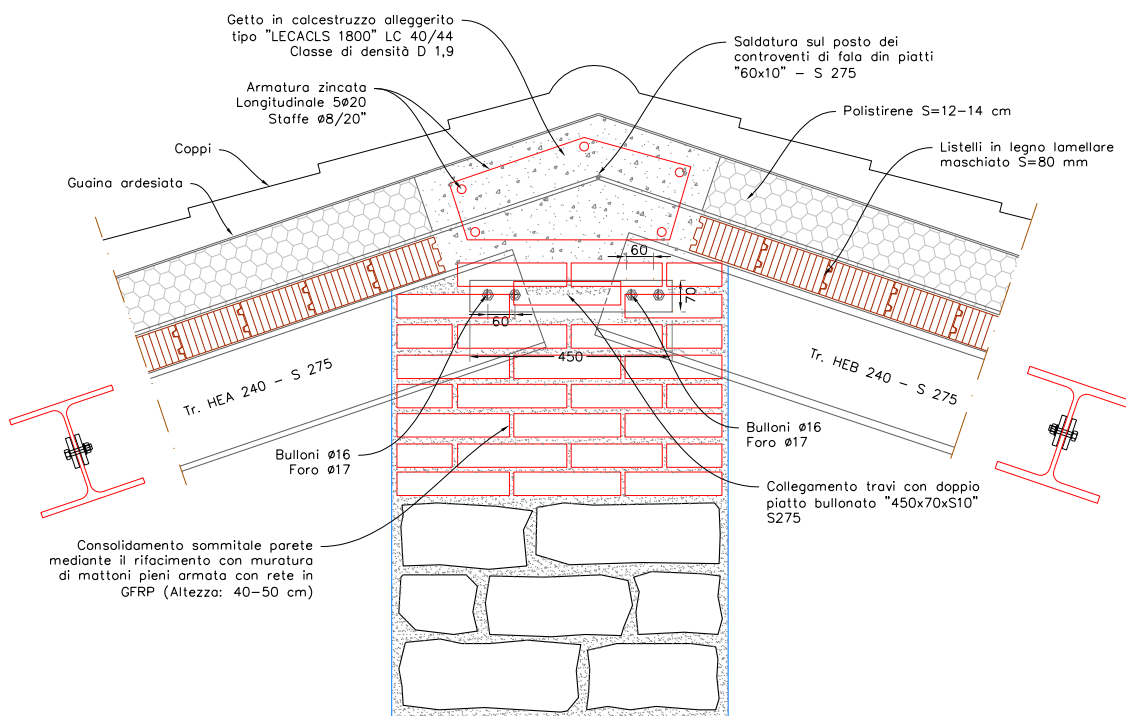


Figura 4.14 - Particolare del collegamento nella sezione di colmo

#### **4.1.3 Interventi di rinforzo delle pareti perimetrali al piano Strada**

L'intervento prevede il rinforzo delle pareti perimetrali lato Strada del Quadriportico, in modo da renderle idonee al trasferimento delle forze orizzontali provenienti dai piani soprastanti, come descritto nel Capitolo 4.1.1.

L'intervento è caratterizzato dalle seguenti lavorazioni:

- Chiusura di alcuni vani con muratura di mattoni adeguatamente ammorsata con interventi cucì e scucì sulle pareti laterali al fine di incrementarne la capacità tagliante;
- Ripristino della tessitura muraria mediante interventi di cucì/scucì, e previa rimozione, solo per la parete Sud, del paramento superficiale in laterizio;
- Realizzazione di intonaco armato con malta di calce e cemento e rete in fibra di vetro sulle pareti laterali (lato nord e sud del Quadriportico, come mostrato in Figura 4.15);
- Ripristino della parete lato Piazza, interessata da fessure superficiali diffuse e perdita di spessore sul lato esterno, con interventi di cucì e scucì ed iniezione con malte leganti del riempimento ("sacco") per il collegamento dei due paramenti, recupero degli spessori mancanti con sostituzione di adeguati elementi di pietra e realizzazione di cuciture con barre elicoidali  $\phi 12$  in acciaio inox (Figura 4.16) avendo cura di fermare le barre a 5/10 cm dal paramento esterno della parete.



Figura 4.15 - Particolare intonaco armato con barre passanti elicoidali e rete in fibra di vetro



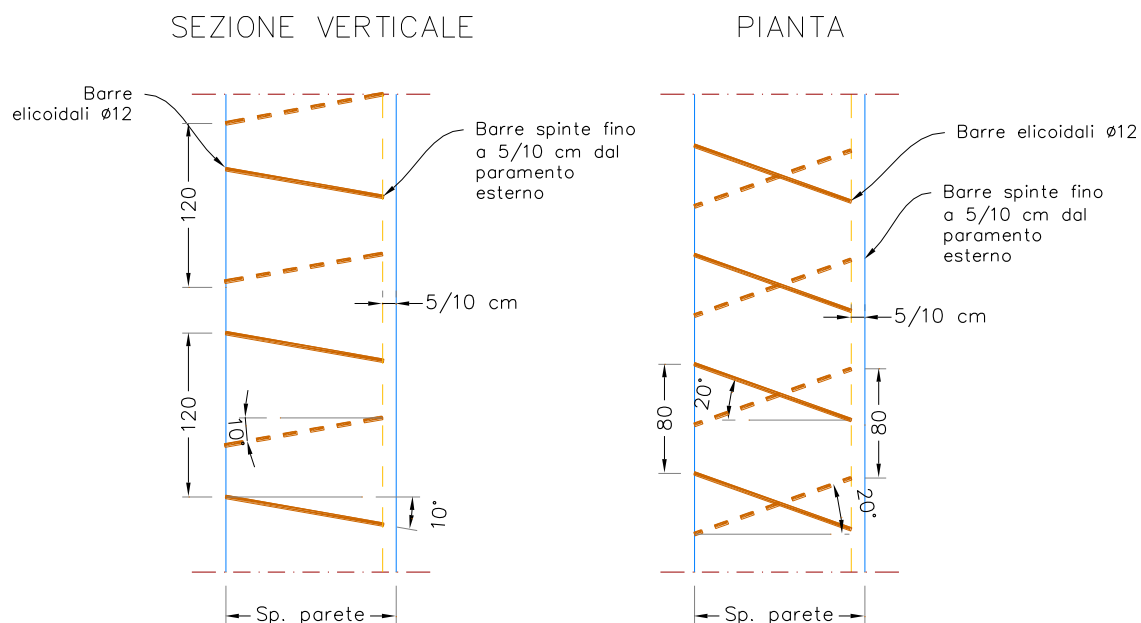


Figura 4.16 - Intervento di cucitura con barre elicoidali sulla parete faccia-vista lato Piazza

#### 4.1.4 Interventi di ripristino

Sono previsti infine i seguenti interventi di ripristino di tutte le murature degradate o lesionate:

- Interventi di cucì/scucì localizzati in tutte le zone interessate dalle lesioni maggiori in modo da ripristinare la continuità e la tessitura dell'elemento strutturale;
- Ristilatura dei giunti di malta del paramento esterno della parete lato Piazza e lato via Betti, soprattutto nella parte alta della parete, dove la muratura risulta più sconnessa e dove è presente lo stato tensionale più basso, e in tutte le zone caratterizzate da lesioni di piccola entità.
- Ripristino del paramento murario lato Piazza in arenaria faccia vista nei tratti degradati, mediante Silicato di Etile, che agisce da legante per il materiale decoeso, senza modificarne la traspirabilità e l'aspetto cromatico;
- Chiusura di nicchie con mattoni pieni, garantendo un adeguato ammorsamento al pannello murario esistente.

#### 4.1.5 Interventi sulle colonne

Gli interventi sulle colonne possono essere divisi in due categorie:

- Interventi di ripristino superficiale dell'arenaria dei fusti e dei basamenti delle colonne mediante Silicato di Etile, che agisce da legante per il materiale decoeso, senza modificarne la traspirabilità e l'aspetto cromatico;
- Interventi di consolidamento statico delle colonne, che a loro volta possono essere divisi in due tipologie, a seconda dell'eccentricità rilevata della colonna:
  1. Interventi di cerchiatura delle colonne con elementi metallici inseriti dall'alto o dal basso a contrasto, con passo di circa 70 cm (Figura 4.18).
  2. Interventi di smontaggio delle colonne e del capitello, livellamento del basamento, rimontaggio dei fusti, installazione di adeguata carpenteria metallica in testa per la rimessa in carico e successivo rimontaggio dei capitelli da eseguire su tutte le colonne al termine del processo di smontaggio e rimontaggio di cui al punto 1 (Figura 4.17);

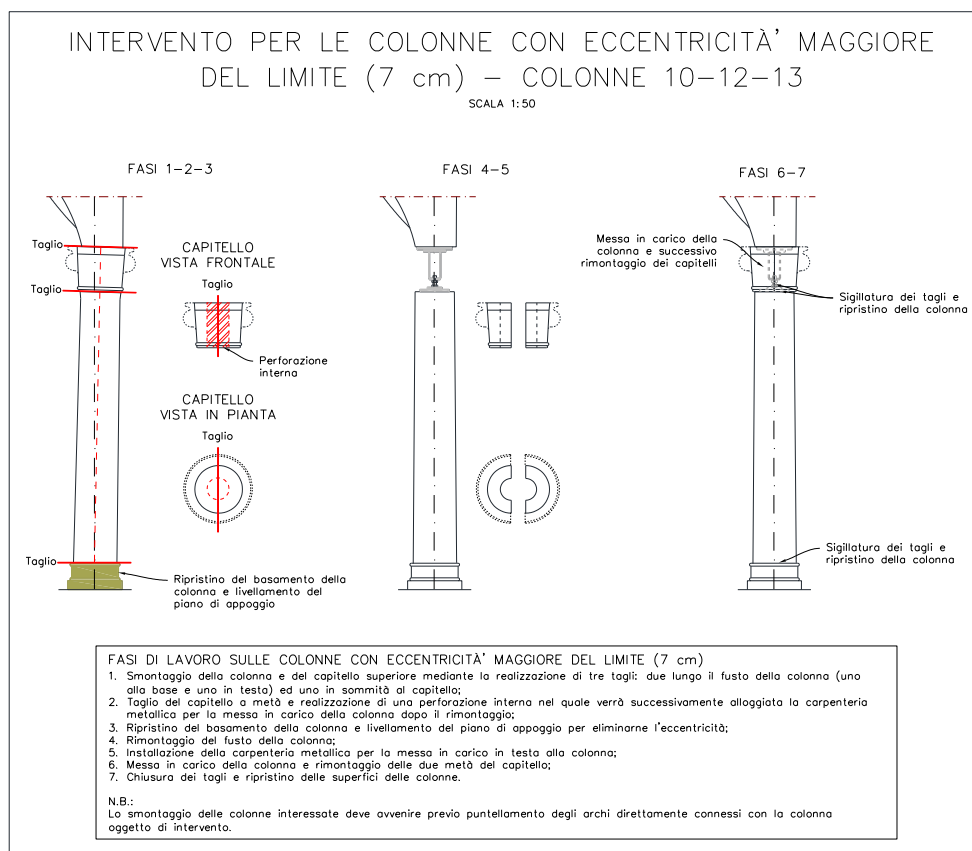


Figura 4.17 - Intervento di smontaggio e rimontaggio delle colonne 10, 12 e 13

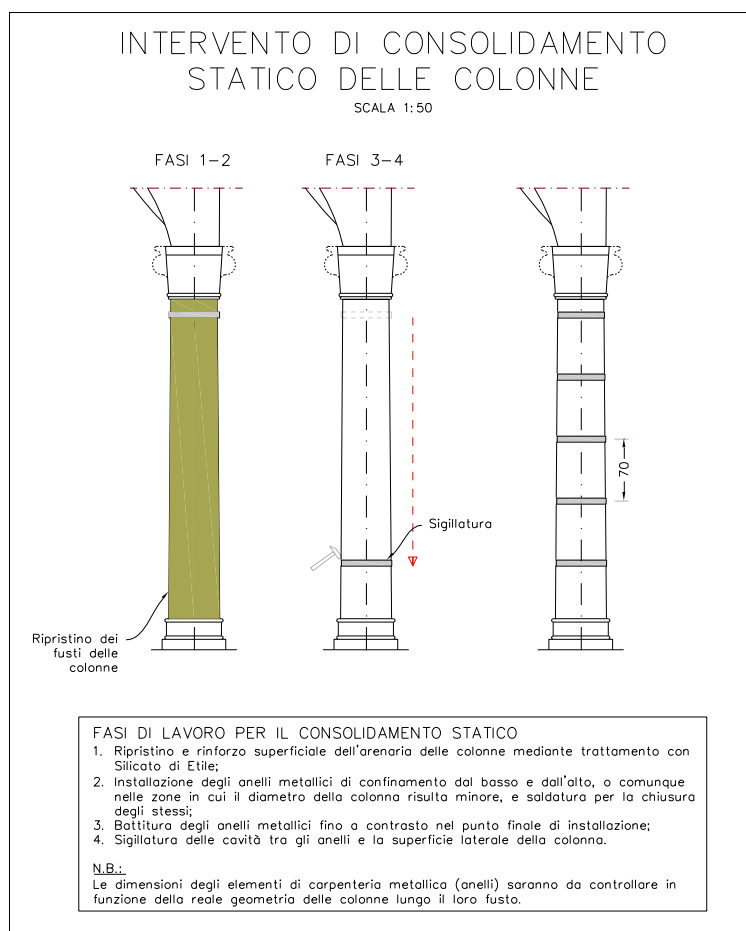


Figura 4.18 - Intervento di cerchiatura delle colonne

## 4.2 Interventi sui Corpi B e C

Gli interventi da eseguire sul corpo B riguardano principalmente il piano Nobile e il piano Ammezzato del vano scala e della Torre.

Sul vano scala sono previsti interventi di:

- Ricostruzione della parete interessata dal crollo;
- Ripresa a cuciture/scuciture delle lesioni esistenti sulle altre pareti;
- Interventi di collegamento della scala alle pareti laterali con profilati metallici.

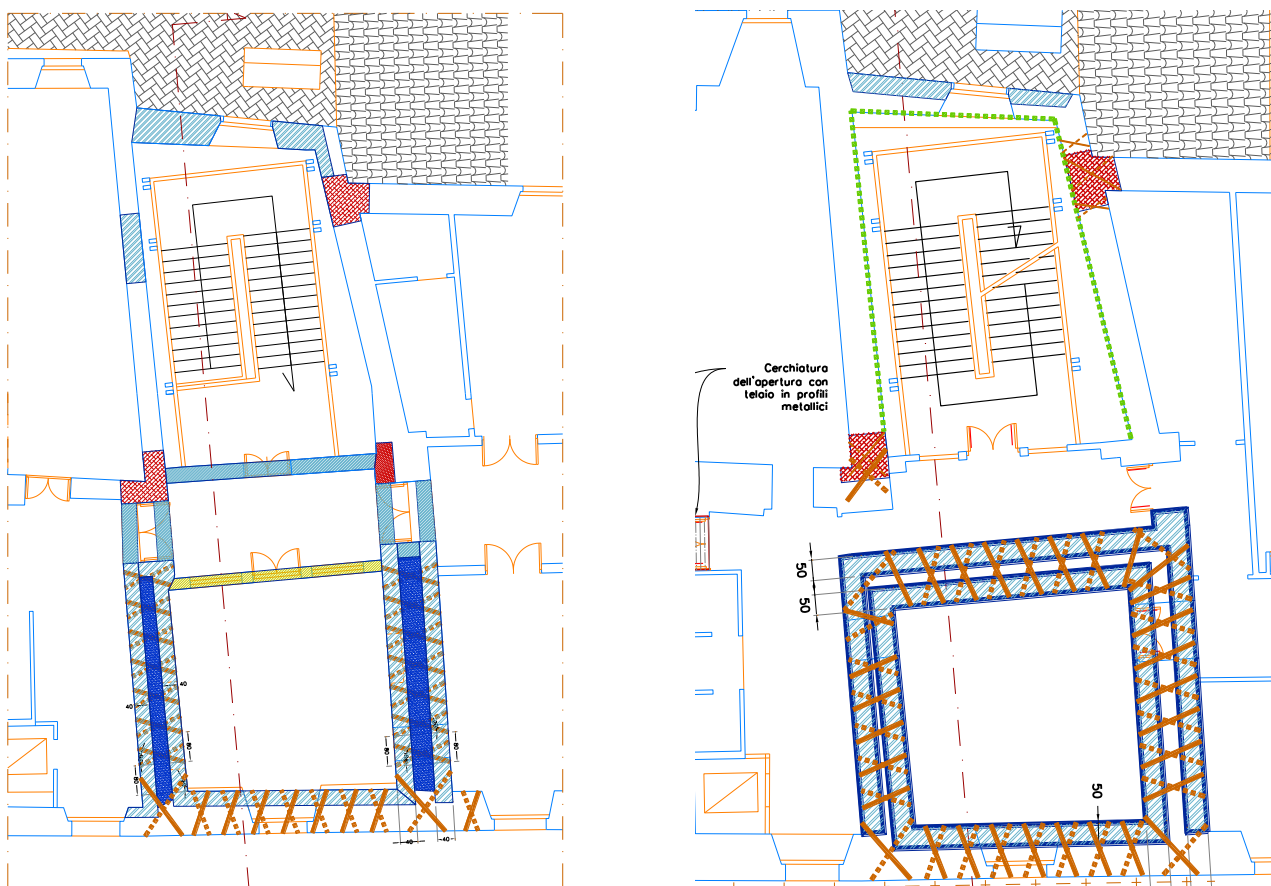



Figura 4.19 - Interventi sul corpo scala e sulla Torre del Corpo B: Piano Nobile e Piano ammezzato

Gli interventi previsti sulla Torre riguardano essenzialmente il rinforzo delle pareti in muratura in pietra mista a mattoni, notevolmente fessurata, con cuciture armate eseguite con barre elicoidali in acciaio inox. Le barre sono inserite a secco sulle pareti con inclinazione sul piano orizzontale e su quello verticale di circa 20° (Figura 4.16).



	UNIVERSITA' DI CAMERINO	LAVORI DI RIPARAZIONE E MIGLIORAMENTO SIMICO DEL PALAZZO DUCALE DI CAMERINO	RELAZIONE TECNICA
--	----------------------------	--	-------------------

Gli altri interventi da eseguire sul corpo C sono principalmente interventi di ripristino e rinforzo degli elementi strutturali lesionati o degradati, quali:

- Ripresa delle lesioni esistenti e consolidamento della muratura mediante cucì/scucì eseguito con muratura mista di pietra e mattoni e malta di calce idraulica naturale in presenza delle fessure di maggiore entità;
- Chiusura di nicchie negli elementi strutturali principali con muratura mista di pietre e mattoni e malta di calce idraulica naturale con caratteristiche simili all'esistente, adeguatamente ammorsata alla muratura esistente;
- Realizzazione dell'ammorsamento tra elementi non collegati o distaccati mediante cucì/scucì;
- Ristilatura dei giunti di malta nelle zone in cui la tessitura risulta più degradata, o comunque in presenza delle lesioni più piccole;
- Iniezioni di miscele leganti per il consolidamento dei pannelli murari caratterizzati da muratura disaggregata e sconnessa, con boiacche cementizie superfluide a ritiro controllato;
- Realizzazione di intonaco armato in malta di calce e rete in fibra di vetro per uno spessore di 3 cm circa per il ripristino dell'integrità muraria ed aumento della rigidità delle pareti maggiormente danneggiate;
- Realizzazione di cuciture armate con barre elicoidali in acciaio inox per il collegamento dei due paramenti che costituiscono il pannello murario;
- Sostituzione degli architravi ad arco in muratura di mattoni fessurati in chiave e alle reni, con cerchiature in acciaio con piedritti laterali adeguatamente ammorsati alle pareti esistenti;
- Ritesatura delle catene esistenti allentate e realizzazione di nuove catene per il collegamento delle pareti perimetrali;
- Realizzazione di un sottotetto leggero con travi metalliche e pannelli in legno lamellare maschiato di spessore 80 mm sulla parte Sud del Corpo C per ridurre l'altezza libera delle pareti;
- Ripristino delle porzioni di copertura danneggiate e ricostruzione della copertura nella parte a Sud del Corpo C con un sistema leggero come segue:

- Consolidamento della porzione sommitale delle pareti mediante il rifacimento in muratura di mattoni pieni e rete in fibra di vetro, per un'altezza di 40-50 cm;
- Installazione delle nuove capriate e delle nuove travi principali in legno lamellare adeguatamente collegate alle pareti e pannelli in legno lamellare maschiati di spessore 80 mm;
- Realizzazione di un sistema di controventi di falda in piatti metallici adeguatamente saldati ad un piatto metallico perimetrale, collegato a sua volta alle pareti mediante barre  $\phi 14/40$  cm inghisate alla porzione sommitale di muratura.

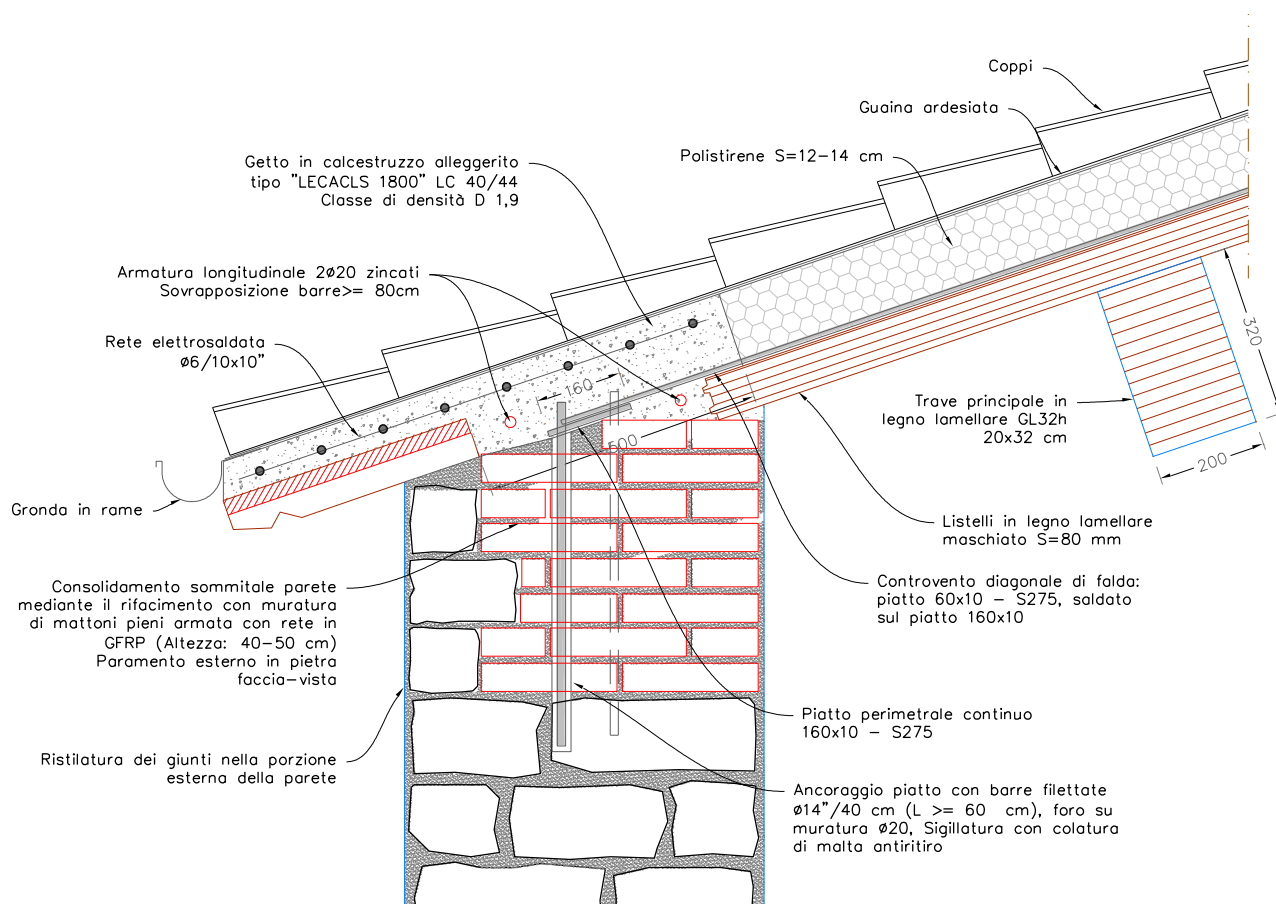


Figura 4.20 - Particolare dei cordoli sui muri perimetrali

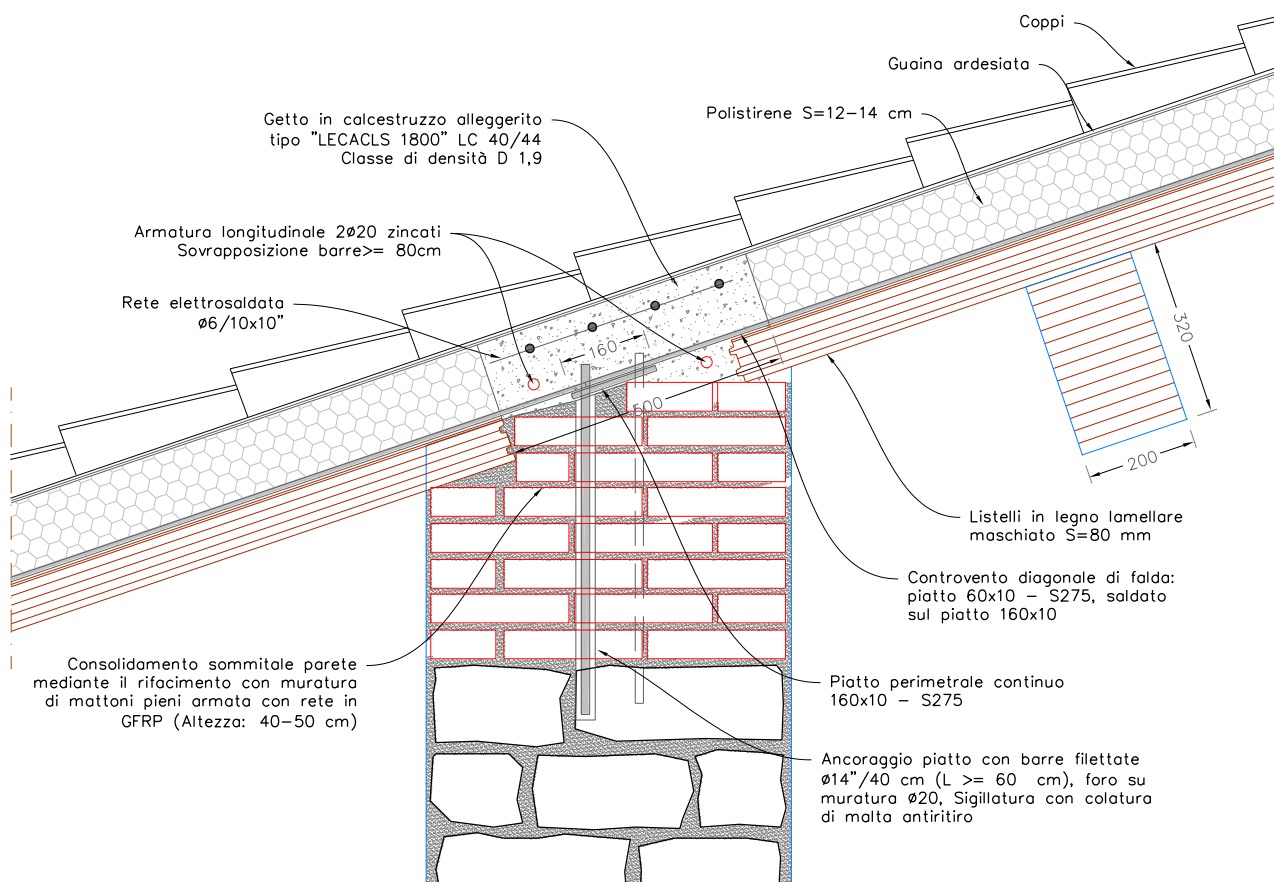


Figura 4.21 - Particolare dei cordoli sulle pareti interne

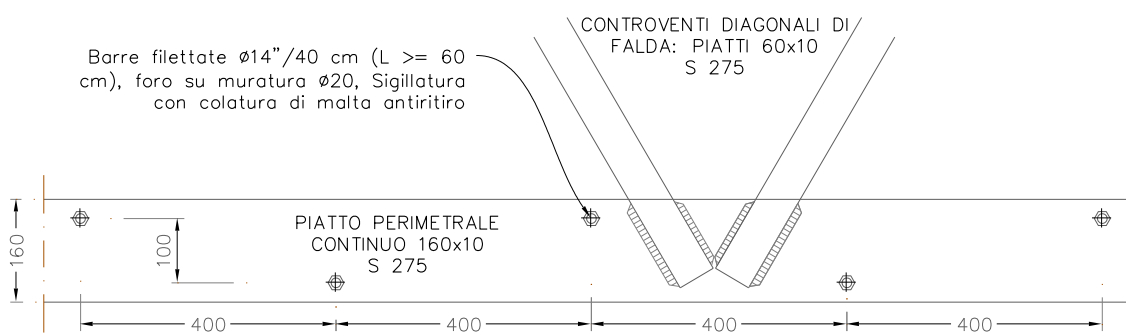


Figura 4.22 - Particolare collegamento controventi al piatto metallico perimetrale

Sono inoltre previsti i seguenti interventi:

✓ Corpo scala interessato dal crollo di una parete:

- Demolizione e ricostruzione delle porzioni di scala danneggiate dal crollo al piano Nobile e al piano Ammezzato;

- Ripristino della muratura mediante cuci/scuci e cucitura con barre metalliche elicoidali in acciaio inox;
- ✓ Sala degli stemmetti
  - Sulle pareti interne sono previsti interventi di cuci/scuci per la ripresa delle lesioni maggiori e cucitura con barre elicoidali inserite a secco con inclinazione di 20° circa sia orizzontalmente che verticalmente;
  - Sull'angolo con la scala a chiocciola è previsto un intervento di cucitura della parete che ha subito un distacco dalla parete ortogonale della sala degli Stemmetti.

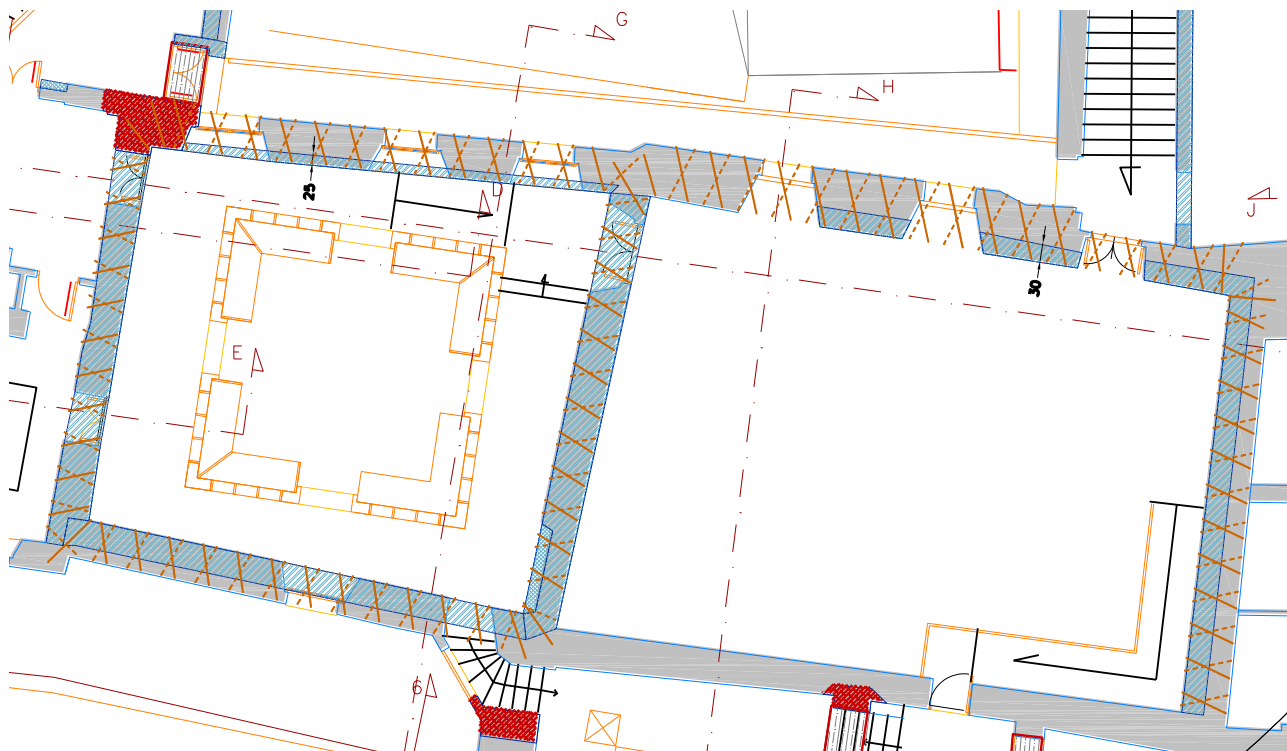


Figura 4.23 - Interventi sale degli Stemmetti e degli Stemmi

- ✓ Sala degli Stemmi
  - Le pareti maggiormente fessurate saranno riprese con interventi di cuci/scuci e con barre di cucitura elicoidali inserite a secco con inclinazione di 20° circa sia orizzontalmente che verticalmente.