



#### 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 sul Quadro Fessurativo e sulle indagini

#### DISCIPLINA

### STRUTTURE

ELABORATO:

D

0 0 2

REVISIONE	DATA:	OGGETTO:	REDATTO:	VERIFICATO:	APPROVATO:	SCALA:
rev_00	05/09/2022	EMISSIONE DEL PROGETTO	AG	AB	LD	
rev_01	__/__/__					
rev_02	__/__/__					
rev_03	__/__/__					
rev_04	__/__/__					

NOME FILE:

D-002\_Relazione sul Quadro Fessurativo e sulle Indagini

## INDICE

1 Premessa .....	3
2 Breve descrizione dell'edificio .....	4
3 Analisi del quadro fessurativo.....	5
3.1 Corpo A (Quadriportico).....	6
3.2 Corpo B.....	18
3.3 Corpo C.....	23
4 Piano di indagini.....	42
4.1 Campagna di indagine .....	43
4.2 Prove endoscopiche e saggi localizzati.....	43
4.2.1 Pareti.....	44
4.2.2 Solai Corpo A.....	49
4.2.3 Solai Corpo B.....	55
4.2.4 Solai Corpo C.....	59
4.3 Martinetti piatti doppi.....	61
4.4 Caratterizzazione meccanica delle arenarie delle colonne del Quadriportico .....	64
4.5 Indagini radiografiche sulle colonne del Quadriportico.....	66
4.6 Valutazione delle caratteristiche dinamiche e del tiro delle catene del Quadriportico .....	69
4.7 Valutazioni sull'integrità della struttura muraria .....	71
4.8 Valutazione delle caratteristiche dei terreni.....	72

## RELAZIONE SUL QUADRO FESSURATIVO E SULLE INDAGINI

### 1 Premessa

La presente relazione descrive il quadro fessurativo, i rilievi e le indagini eseguite sul complesso edilizio del Palazzo Ducale Da Varano, sito in via Del Bastione, 1, nel Comune di Camerino (MC), finalizzate alla valutazione della vulnerabilità sismica e al progetto degli interventi di riparazione dei danni e miglioramento sismico.



Figura 1.1 - Vista aerea del fabbricato

Dopo una breve descrizione del complesso edilizio, si descrive il quadro fessurativo e si illustrano i rilievi e le indagini eseguite per il raggiungimento del livello di conoscenza LC2.

## 2 Breve descrizione dell'edificio

Il fabbricato si compone di più aggregati di forma pressoché rettangolare ed interconnessi tra loro, secondo la disposizione indicata in Figura 2.1. 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.

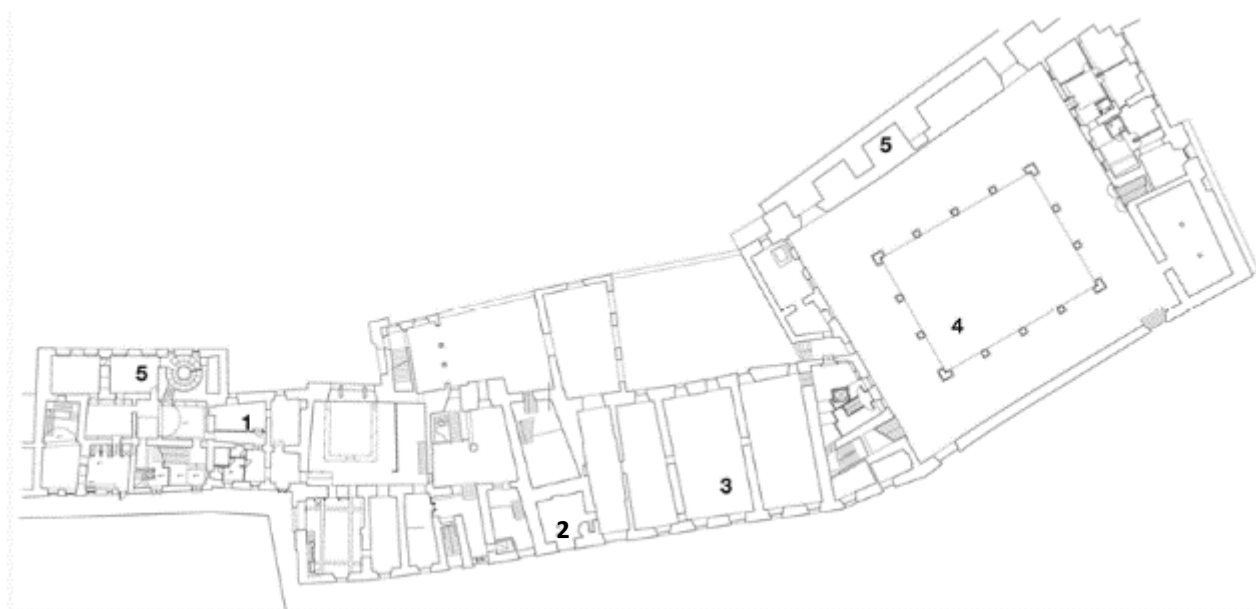


Figura 2.1 – Aggregati che formano il fabbricato

Il complesso edilizio è stato interessato nel tempo da forti terremoti ed interventi di restauro e consolidamento che ne hanno modificato la struttura.

Il terremoto del 1799, che sconvolse la città, produsse danni rilevanti alla copertura e al muro verso le stanze di Governo, vari crolli di soffitti, murature e volte interne, con minaccia di crollo del muro di facciata verso la Piazza. Importanti lavori di restauro e consolidamento furono eseguiti con la costruzione dello sperone su vicolo della Salara e la formazione di pilastri e sott'archi nel cortile maggiore.



Nel 1850 furono eseguiti lavori sulla facciata esterna, con introduzione del balconcino al di sopra del Portale di ingresso.

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, previo radicale consolidamento statico, con rifacimenti murari a partire da terra e pesanti travature in cemento armato.

Nel 1957 viene redatto un Progetto di Risanamento, concentrato sui corpi prospettanti il Cortile che presentavano 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 ricalcatura dei graffiti sulla parete tra le finestre.

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-est del portico.

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.

### 3 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.

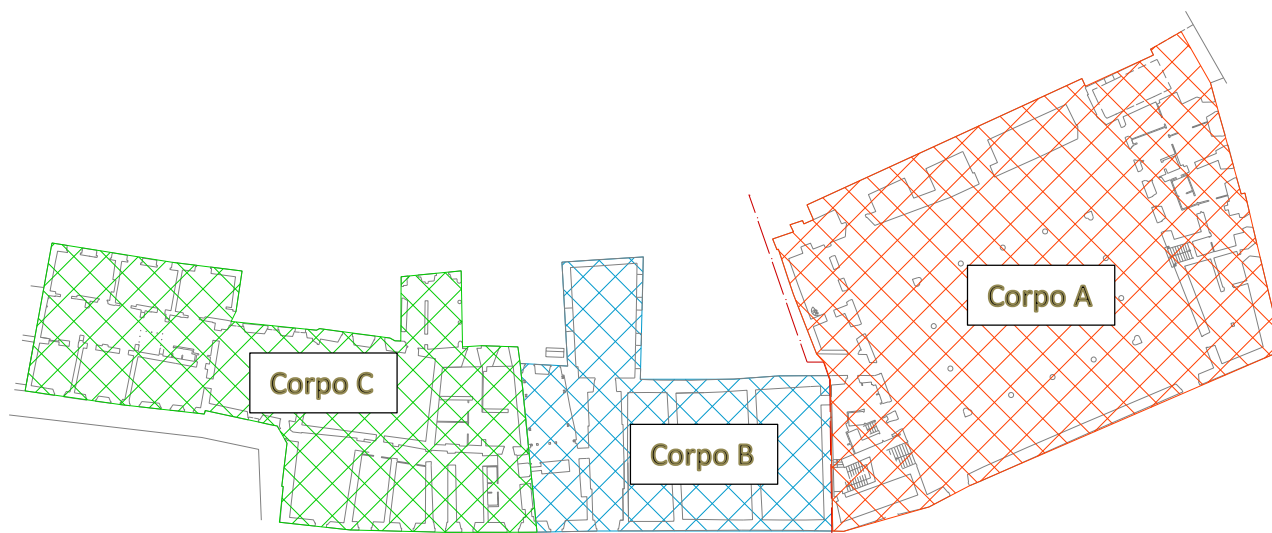


Figura 3.1 - Suddivisione del fabbricato per l'interpretazione del quadro fessurativo

### 3.1 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.

La prima tipologia di danno è causata, come detto, dalla mancanza di un meccanismo efficiente di trasmissione delle azioni inerziali associate alle masse del piano Nobile e della copertura 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 3.2 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.

Le pareti evidenziate in rosso, fortemente indebolite dalle numerose aperture, risultano fortemente fessurate a taglio con formazione di lesioni diagonali ad X sui vari maschi murari (Figura 3.3).

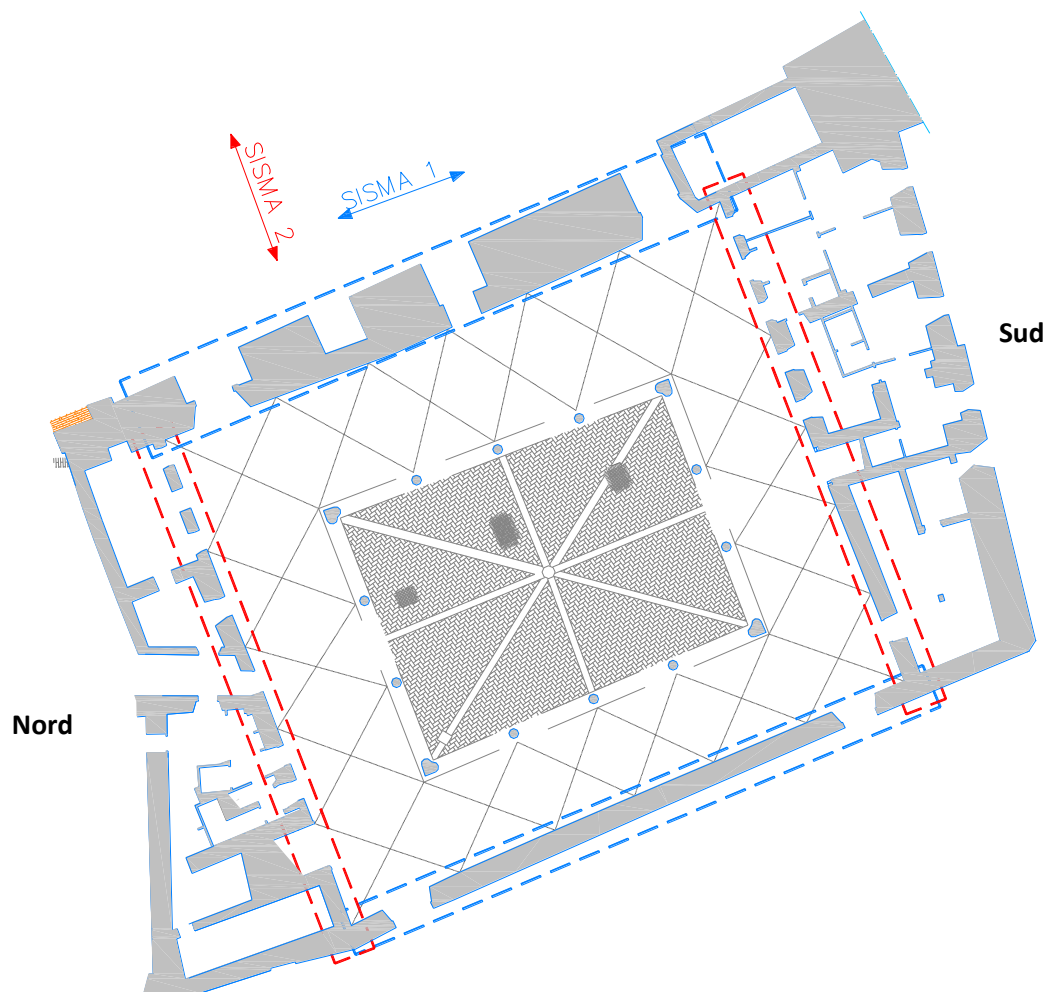


Figura 3.2 - Pannelli murari del Quadriportico al piano Strada: in blu, quelli resistenti al Sisma in direzione 1, e in rosso, quelli resistenti al Sisma in direzione 2, risultati maggiormente fessurati

Al piano Nobile, le pareti interne del Quadriportico non risultano efficacemente collegate alle pareti perimetrali (Figura 3.4): 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 3.3 è riportata un'immagine della fessurazione diagonale presente su una delle pareti sull'angolo nord-est.



Figura 3.3 - Fessurazione a X di un maschio murario nella zona tra due aperture

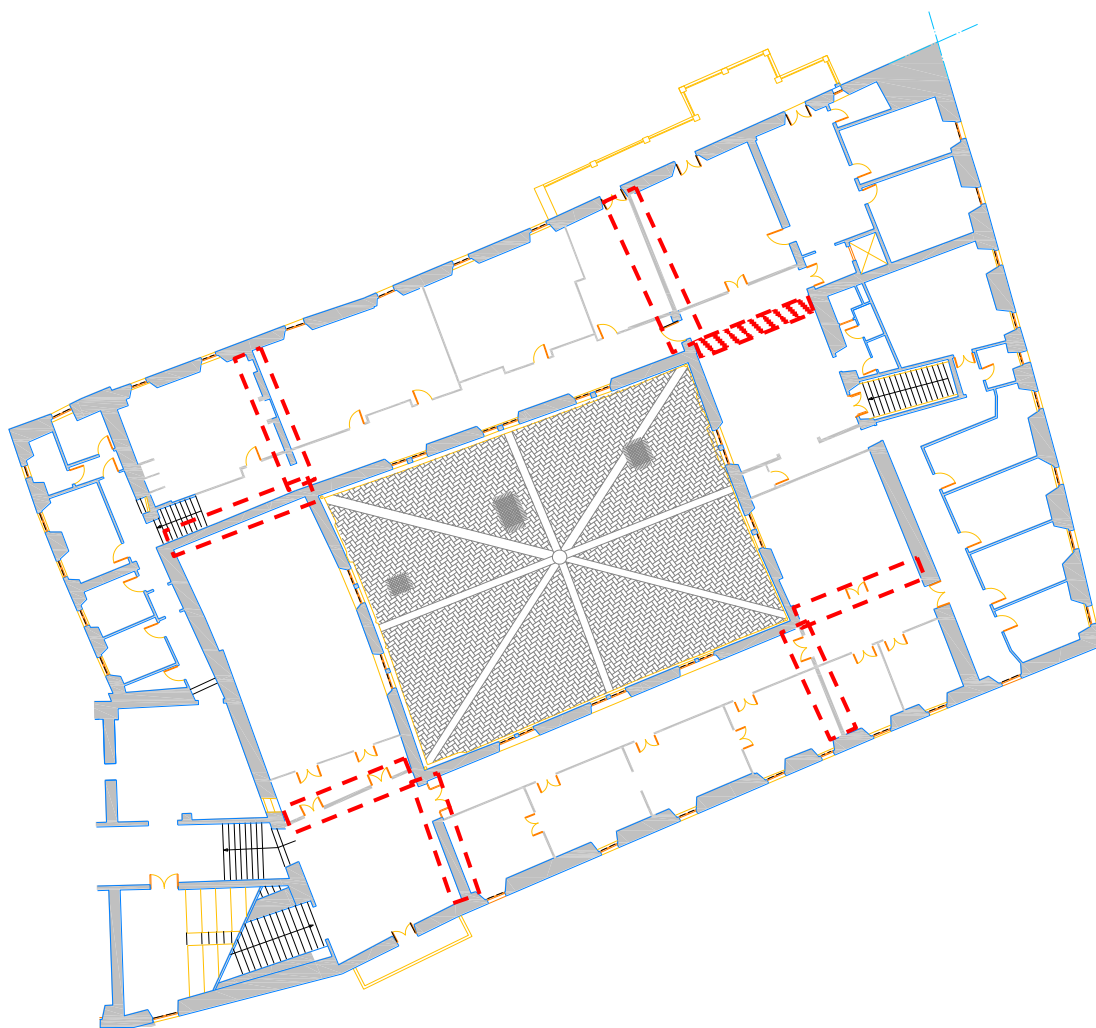


Figura 3.4 - Indicazione in pianta delle pareti di continuità sui quattro angoli



Figura 3.5 - 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 3.6 è possibile notare come ortogonalmente ad entrambe le pareti vi siano solo divisori leggeri.

Due situazioni significative sono evidenziate in Figura 3.6: la parete interna sul lato sud è stata interessata da un meccanismo locale di incipiente ribaltamento verso il portico, come mostrato in Figura 3.7, accompagnato da lesioni diagonali 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 3.8), coincidente con la sommità dello sperone esterno (Figura 3.10), anch'esso accompagnato da lesioni diagonali sul divisorio ortogonale, ad evidenziare la mancanza di un adeguati muri di spina.



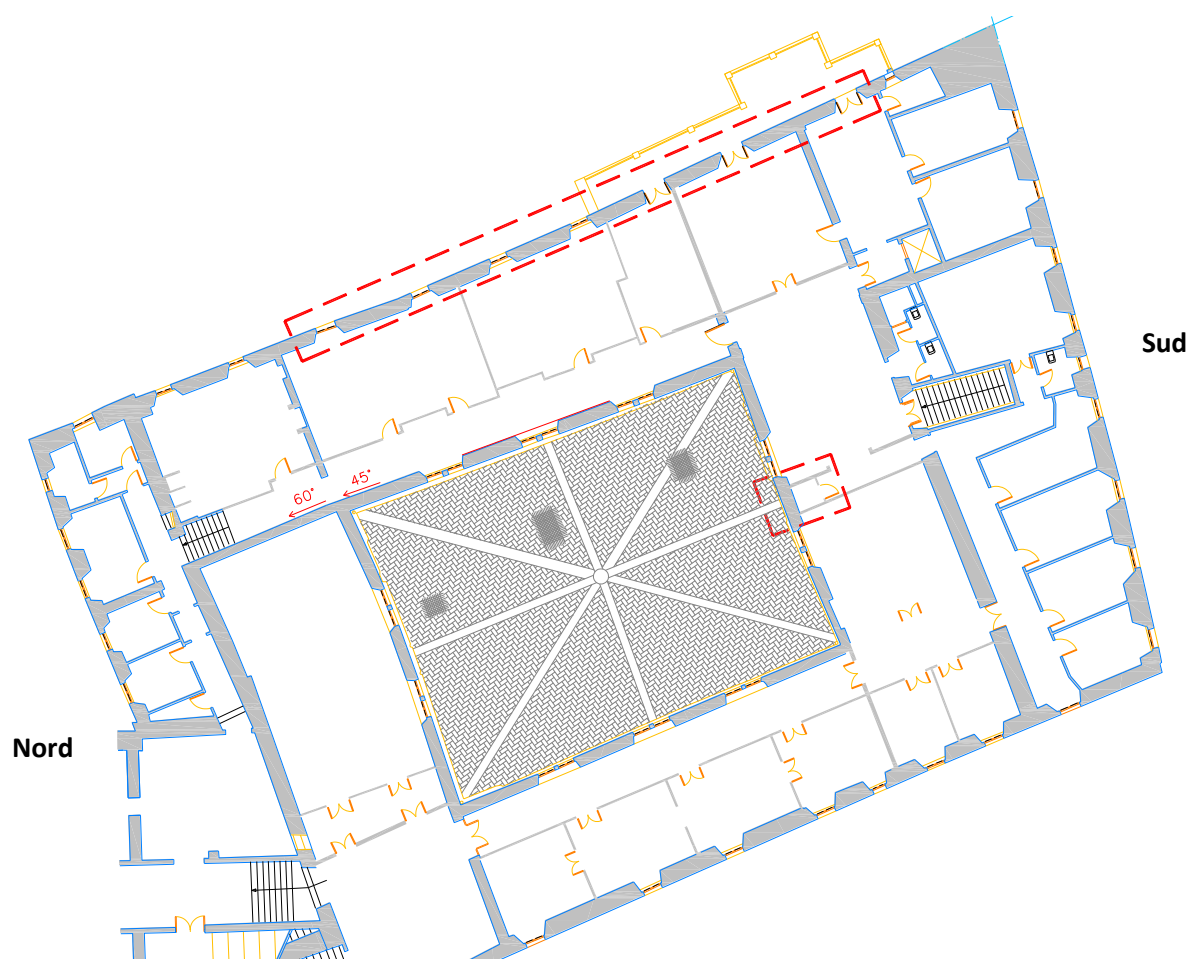


Figura 3.6 - Ubicazione dei due meccanismi locali



Figura 3.7 - Lesione legata al principio di ribaltamento della parete perimetrale lato portico



Figura 3.8 – Lesione sub-orizzontale a circa 50 cm al di sopra della pavimentazione della parete Est lato Orto Botanico



Figura 3.9 - Lesioni a taglio sui divisori ortogonali alla parete di Figura 3.8

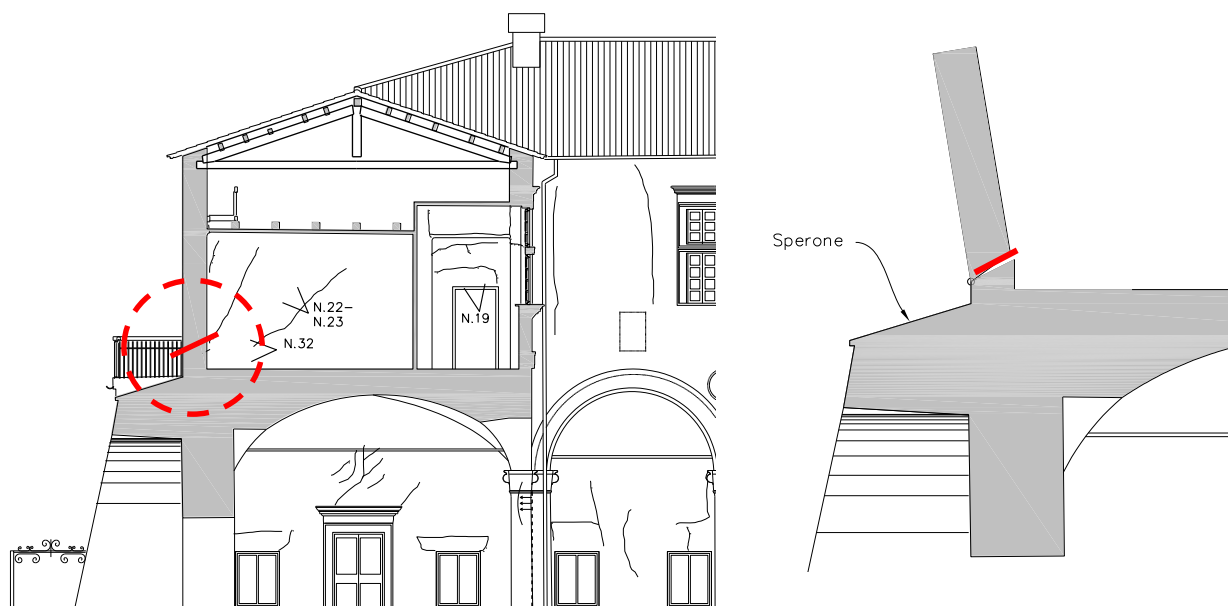


Figura 3.10 - Indicazione nella sezione trasversale del meccanismo locale di ribaltamento rappresentato in Figura 3.8

Di rilievo inoltre il crollò della porzione di parete al di sopra del balconcino sovrastante l'ingresso principale lato piazza (Figura 3.11), 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 3.12).



Figura 3.11 - Ubicazione della porzione di parete crollata

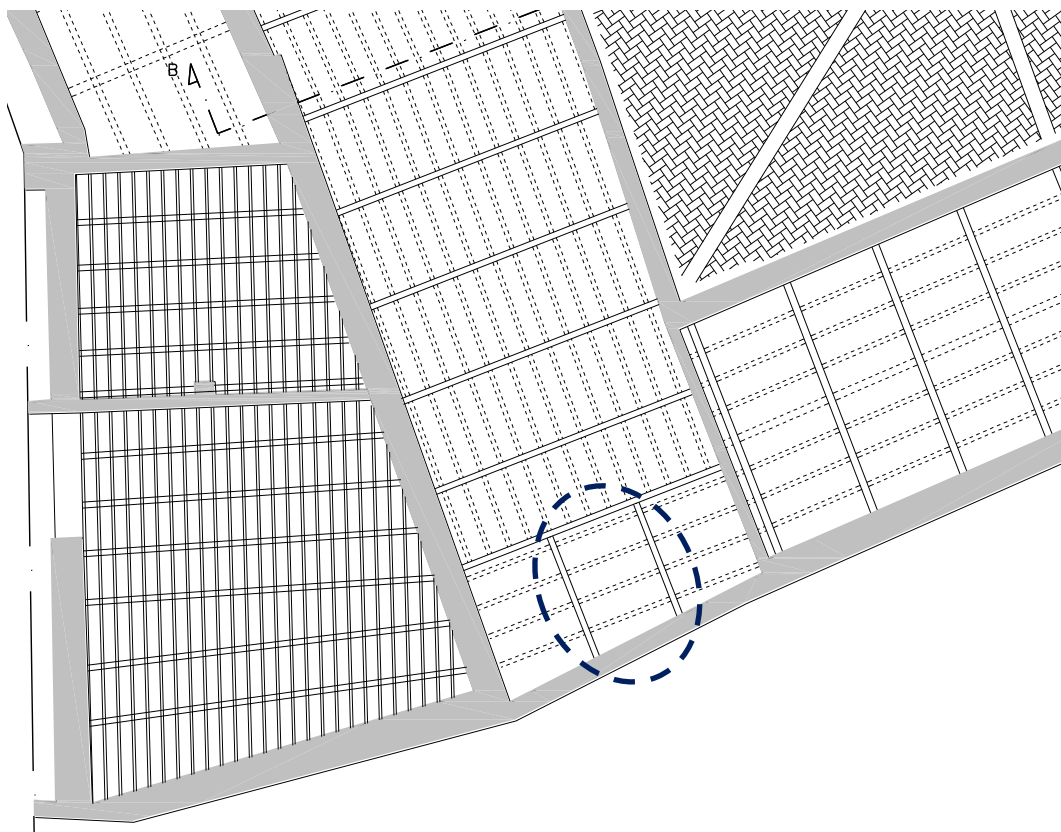


Figura 3.12 - Ubicazione delle due travi di copertura spingenti al di sopra dell'ingresso lato Piazza



Figura 3.13 - Porzione di parete crollata vista dall'interno

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;
- 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;
- Distacco dei due paramenti che costituiscono i pannelli murari, non adeguatamente ammorsati e riempiti con materiale sciolto e disomogeneo;
- Distacco del soffitto in camorcanna dalle pareti, con locali infiltrazioni di acqua piovana;
- Distacco dello spesso strato di intonaco superficiale, a base di cemento, dai blocchi di arenaria che costituiscono la parete;
- Fessurazione diffusa nella parte alta delle pareti, soprattutto al livello del sottotetto, per la bassa entità carico verticale;
- Lesioni nel punto di collegamento tra differenti elementi strutturali.

Oltre ai danni prodotti dal sisma si rileva il degrado superficiale dei blocchi di arenaria che costituiscono il paramento esterno su larghi tratti delle pareti del Quadriportico lato Piazza, cui ne consegue una locale significativa riduzione dello spessore degli elementi che compongono il paramento esterno della parete lato Piazza.





Figura 3.14 - 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 3.15 - Fessurazione lungo i bordi di nicchie richiuse



Figura 3.16 - Fessure per distacco dei due paramenti che costituiscono la parete lato Piazza



Figura 3.17 - Distacco del soffitto in camorcanna dalle pareti e locali infiltrazioni d'acqua



Figura 3.18 - Distacco dello spesso strato di intonaco superficiale dalla parete in arenaria



Figura 3.19 – Lesioni diffuse nella parte alta delle pareti per la bassa entità del carico verticale agente



Figura 3.20 - Lesioni nei punti di collegamento tra il corpo scala e l'arcata superiore di un'apertura



Figura 3.21 - Significativa riduzione dello spessore degli elementi in arenaria sulla parete lato Piazza

### 3.2 Corpo B

Il Corpo B risulta caratterizzato da un quadro fessurativo di minore entità, se si esclude la porzione di sinistra in Figura 3.22, 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.

Nelle figure che seguono è riportata una sintesi del quadro fessurativo.



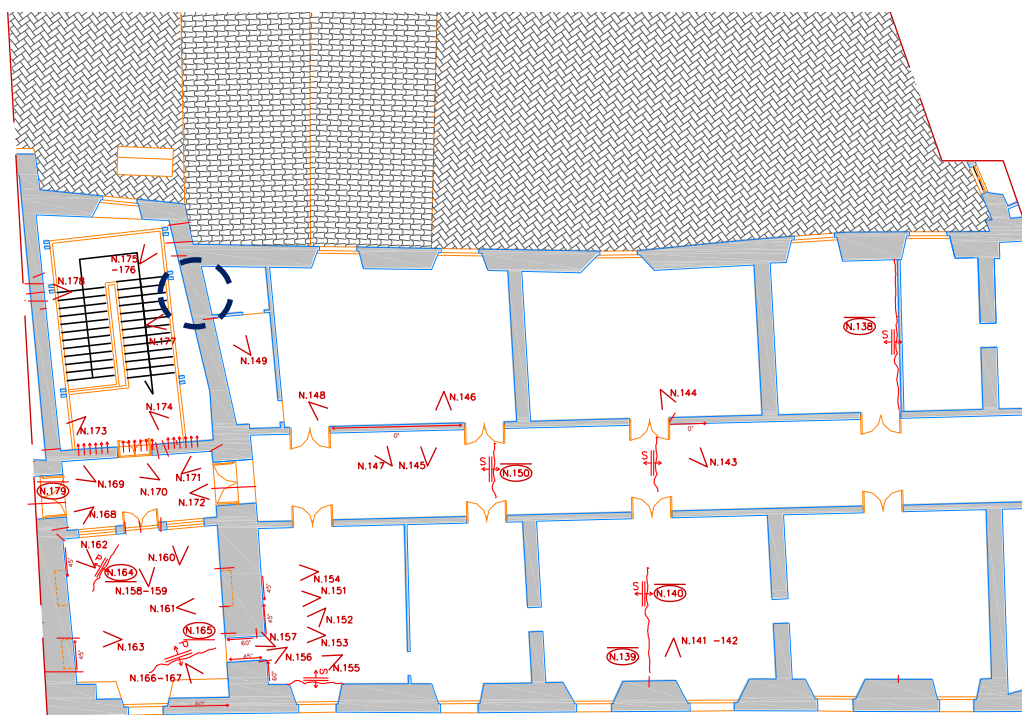


Figura 3.22 - Quadro fessurativo Piano Nobile

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 in corrispondenza della parete ortogonale della porzione più a Sud (Figura 3.23).



Figura 3.23 - 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 3.24);
- Lesione verticale in corrispondenza dello spigolo a segnalare la totale assenza di ammortamento tra pareti ortogonali (Figura 3.25);
- Crollo della porzione superiore della parete in corrispondenza della porta di accesso al vano scala (Figura 3.26 e Figura 3.27). 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 3.24 – Lesioni diffuse al vano scala



Figura 3.25 – Lesione verticale per mancanza di ammortamento

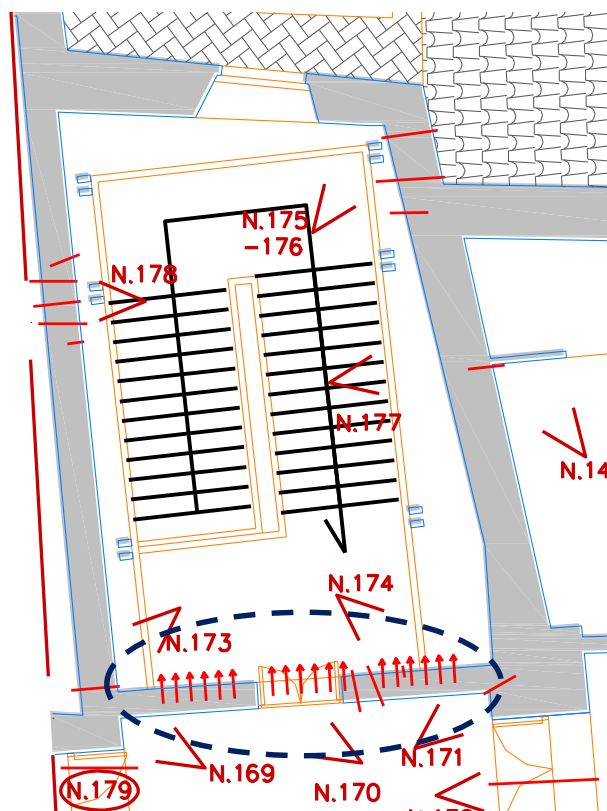


Figura 3.26 - Tratto interessato dal crollo della parete della scala



Figura 3.27 - 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 3.28).





Figura 3.28 - Lesioni diffuse sulle pareti della torre

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

### 3.3 Corpo C

Il Corpo C è caratterizzato dalla presenza di un quadro fessurativo piuttosto ampio (Figura 3.29), conseguenza della scarsa qualità della tessitura muraria.



Figura 3.29 - Quadro fessurativo caratteristico del Corpo C

Nelle figure che seguono è riportata una sintesi del quadro fessurativo ai vari livelli.



Figura 3.30 - Quadro fessurativo Piano Strada



Figura 3.31 - Quadro fessurativo Piano Stemma

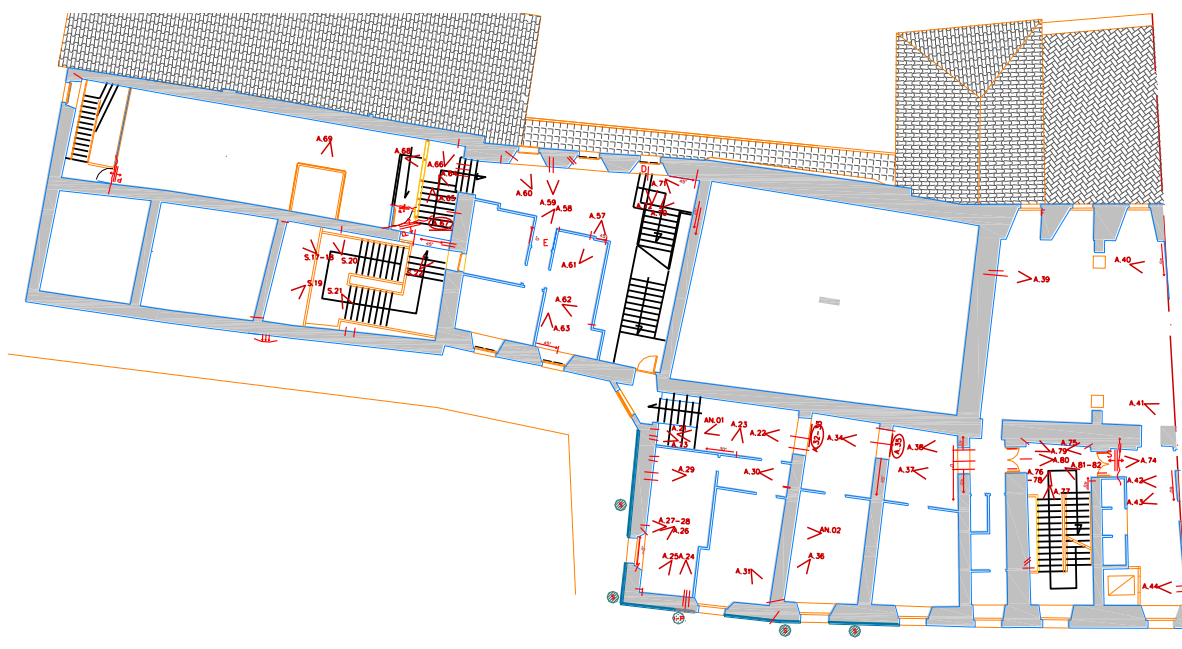


Figura 3.32 - Quadro fessurativo Piano Ammezzato



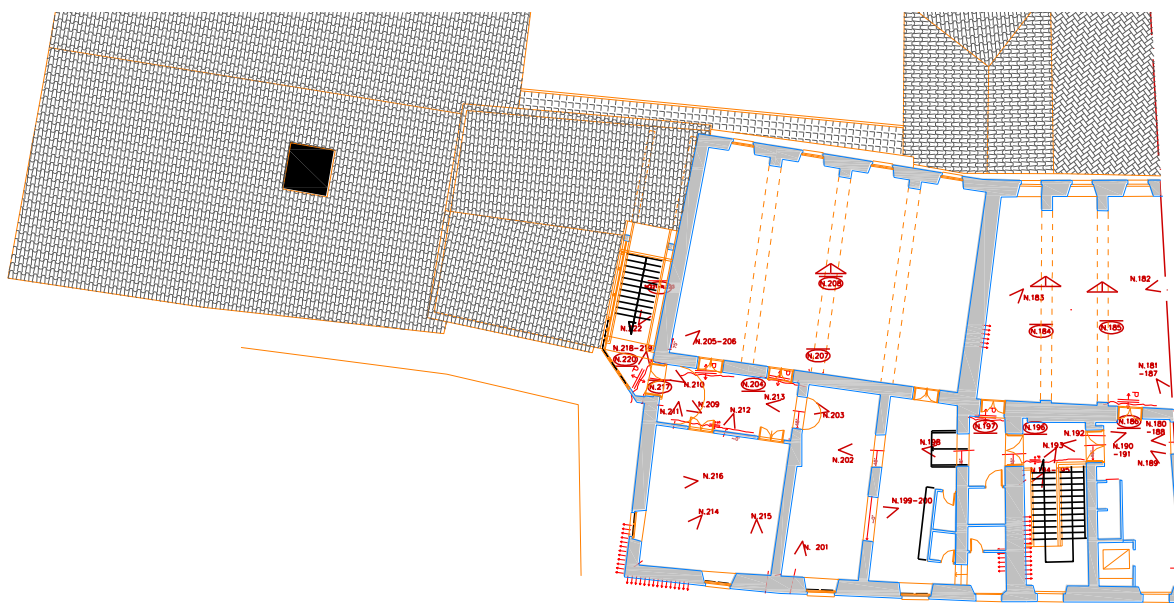


Figura 3.33 - Quadro fessurativo Piano Nobile

Si elencano le situazioni locali che hanno mostrato maggiori criticità:

1. In corrispondenza del loggiato sul lato Orto Botanico, si riscontra la fessurazione, in chiave, di tutti gli archi del loggiato (Figura 3.34 a), nonché un livello di degrado piuttosto avanzato dei basamenti delle colonne di supporto (Figura 3.34 b).



a)



b)

Figura 3.34 - 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 3.35), ed orizzontali a livello della pavimentazioni, causate dal mancato ammassamento di questa porzione al Corpo C.

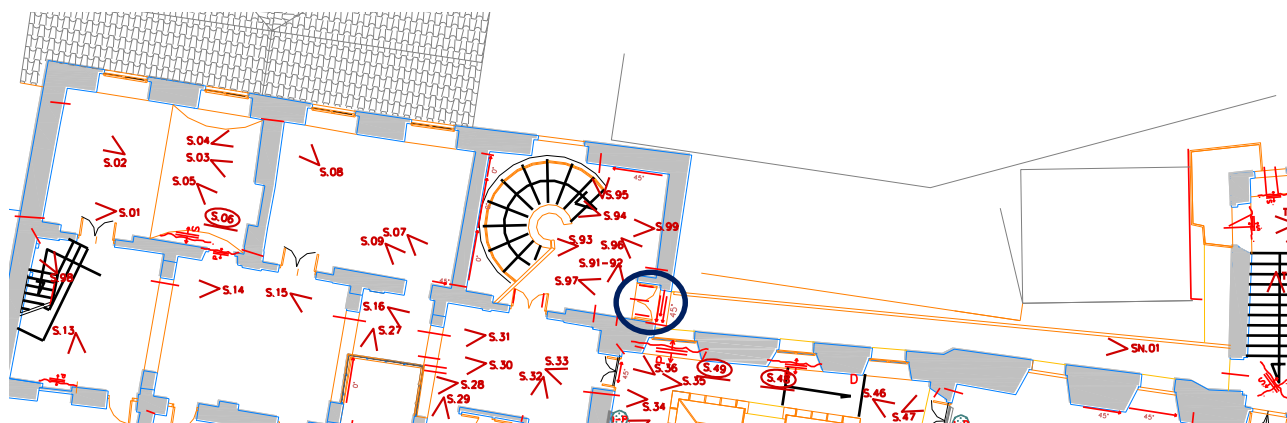


Figura 3.35 - Dettaglio del quadro fessurativo nel vano della scala a chiocciola



a)



b)

Figura 3.36 - Lesioni verticali sulle pareti per distacco del vano scala a chiocciola: a) al piano Strada, b) al piano Stemmi

Tale distacco è particolarmente evidente al di sopra della porta che collega la scala a chiocciola alla passerella esterna (cerchiata in Figura 3.35), come mostrato in Figura 3.37.



a)



b)

Figura 3.37 - Distacco della parete della scala a chiocciola al di sopra della porta indicata in Figura 3.36: a) vista dall'esterno, b) vista dall'interno

3. La Sala degli Stemmetti (Figura 3.38) presenta un quadro fessurativo molto importante, caratterizzato da:

- Distacco dell'intonaco dal paramento murario (Figura 3.39 a);
- Fessurazione diffusa (Figura 3.39 b) per la scarsa qualità della tessitura muraria e della discontinuità delle tipologie murarie, non adeguatamente ammortate, che compongono le pareti;
- Alcune situazioni di fuori-piombo particolarmente evidenti nella parte alta delle pareti (Figura 3.40), 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 3.41;
- Crollo parziale del controsoffitto in cartongesso della Sala degli Stemmetti.





Figura 3.38 - Ubicazione della Sala degli Stemmetti al livello del piano degli Stemmi



a)



b)

Figura 3.39 - Quadro fessurativo delle pareti della Sala degli Stemmetti

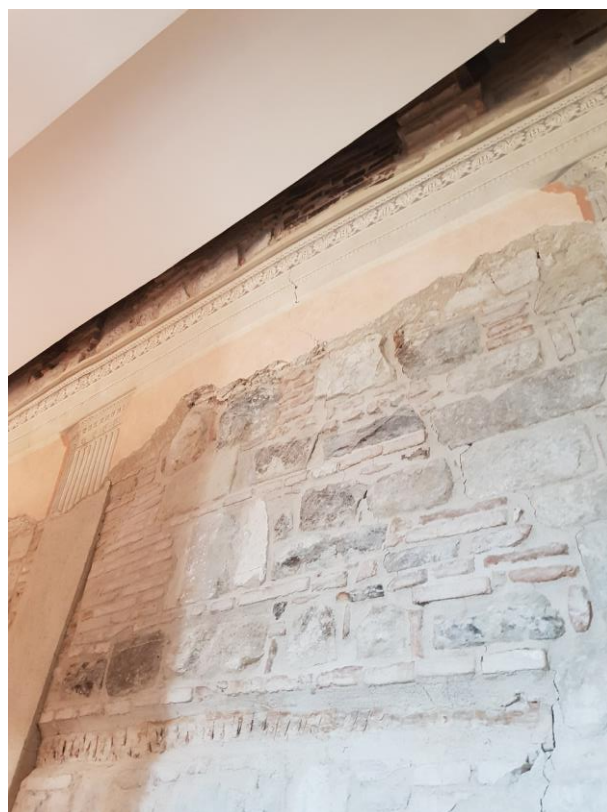


Figura 3.40 - Fuori piombo delle pareti della Sala degli Stemmetti

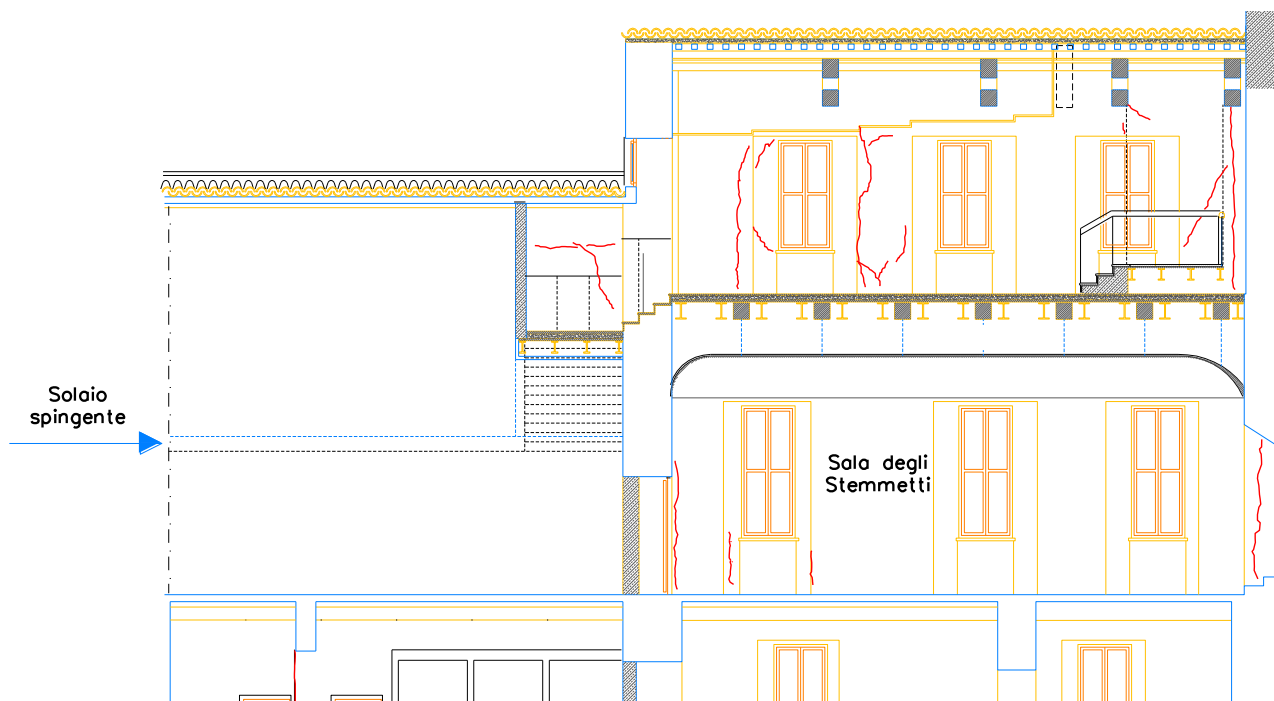


Figura 3.41 - Solaio spingente sulla parete sinistra della Sala degli Stemmetti



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 3.42);
- Fessurazione diffusa della parete adiacente alla Sala degli Stemmetti (Figura 3.43 a), dovuta alla scarsa qualità della tessitura muraria. Nella stessa Figura 3.43 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 3.44 e Figura 3.45) accompagnate da lesioni verticali in corrispondenza delle pareti delle sale adiacenti (Figura 3.46);
- Lesioni dovute al distacco della volta in cartongesso dalle pareti perimetrali (Figura 3.47).



Figura 3.42 - Caduta di porzioni di intonaco dalle pareti



a)



b)

Figura 3.43 - Quadro fessurativo della Sala degli Stemmi: a) fessurazione diffusa delle pareti, b) dettaglio della lesione orizzontale in corrispondenza della catena

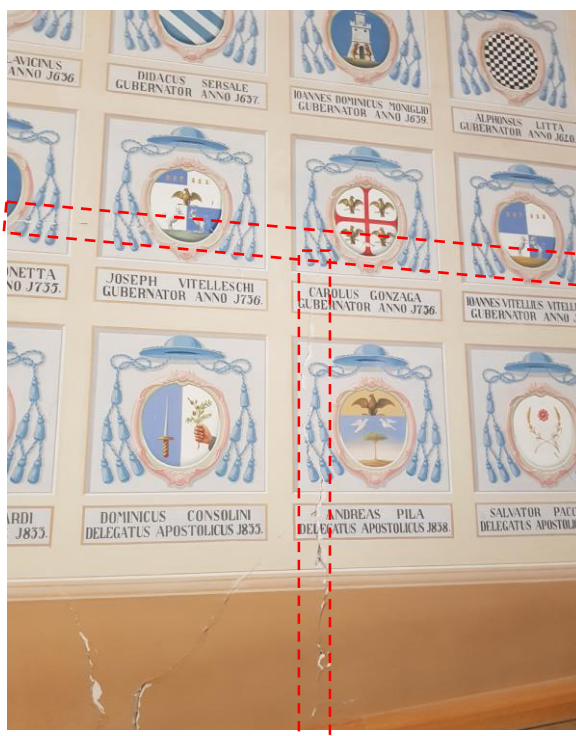
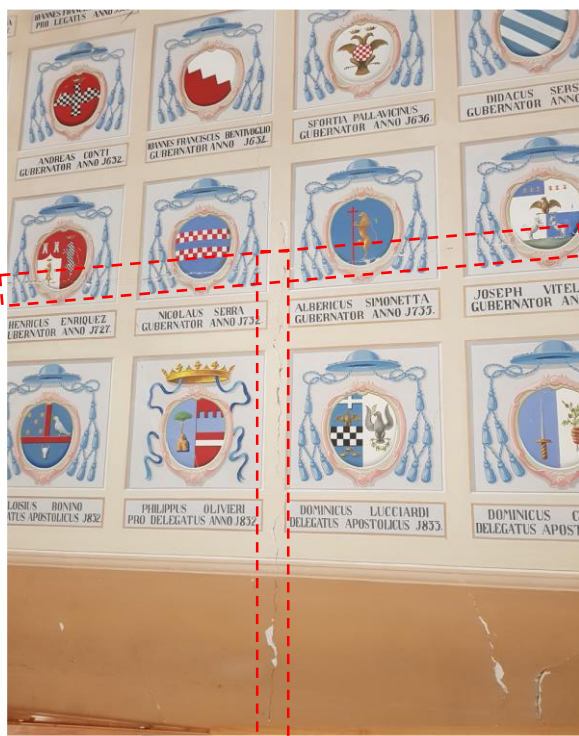


Figura 3.44 – Lesione orizzontale a livello del solaio delle sale adiacenti e verticale a livello delle pareti ortogonali delle sale adiacenti

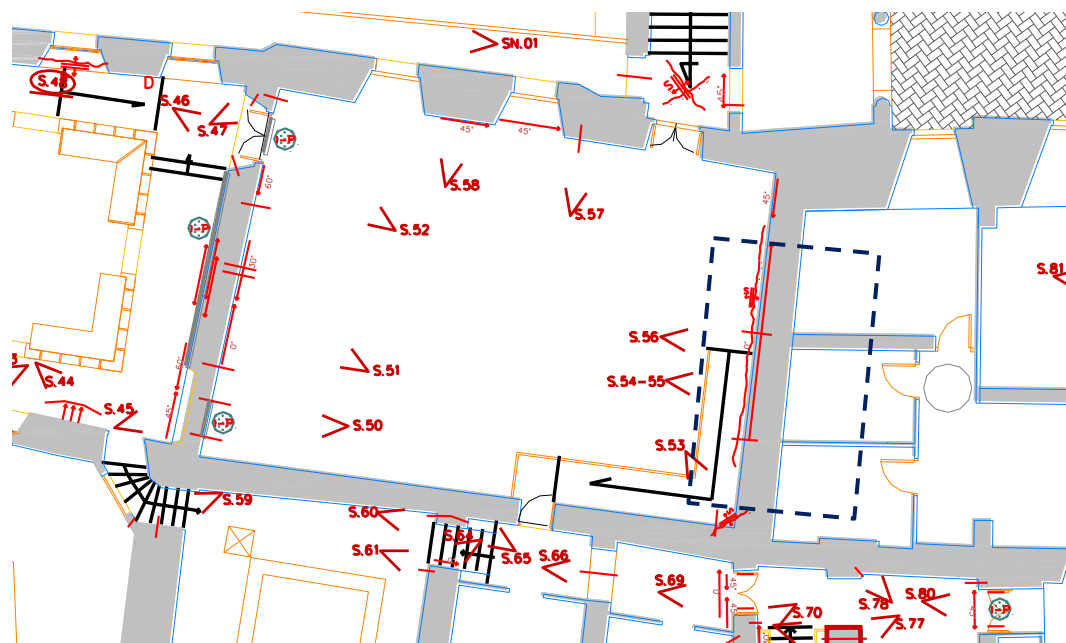


Figura 3.45 - Ubicazione parete con fessure verticali ed orizzontali: sono ben visibili le due pareti ortogonali in corrispondenza delle lesioni verticali

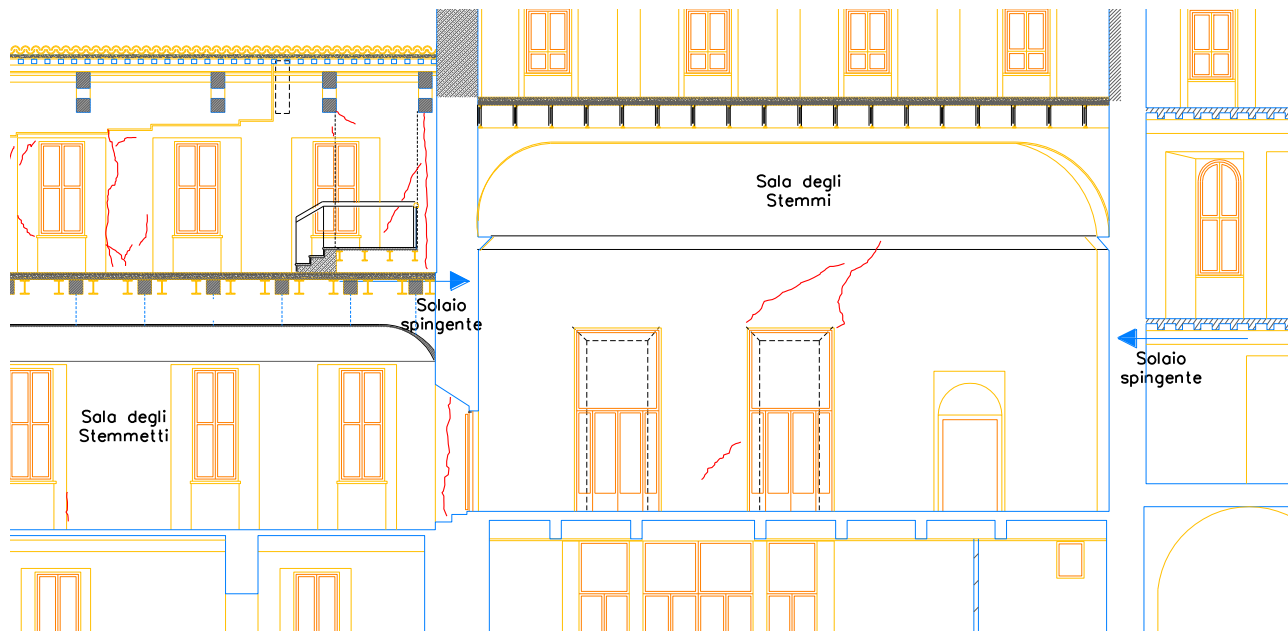


Figura 3.46 - Ubicazione sulla sezione trasversale dei solai spingenti sulle pareti della Sala degli Stemmai





Figura 3.47 - 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 3.48).



Figura 3.48 - Lesione a taglio della parete

6. Fessurazioni diffuse nella zona evidenziata in Figura 3.49 al livello del piano Ammezzato, per la presenza di pareti di spessore molto importante con tessitura muraria irregolare (Figura 3.50). In Figura 3.51 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.

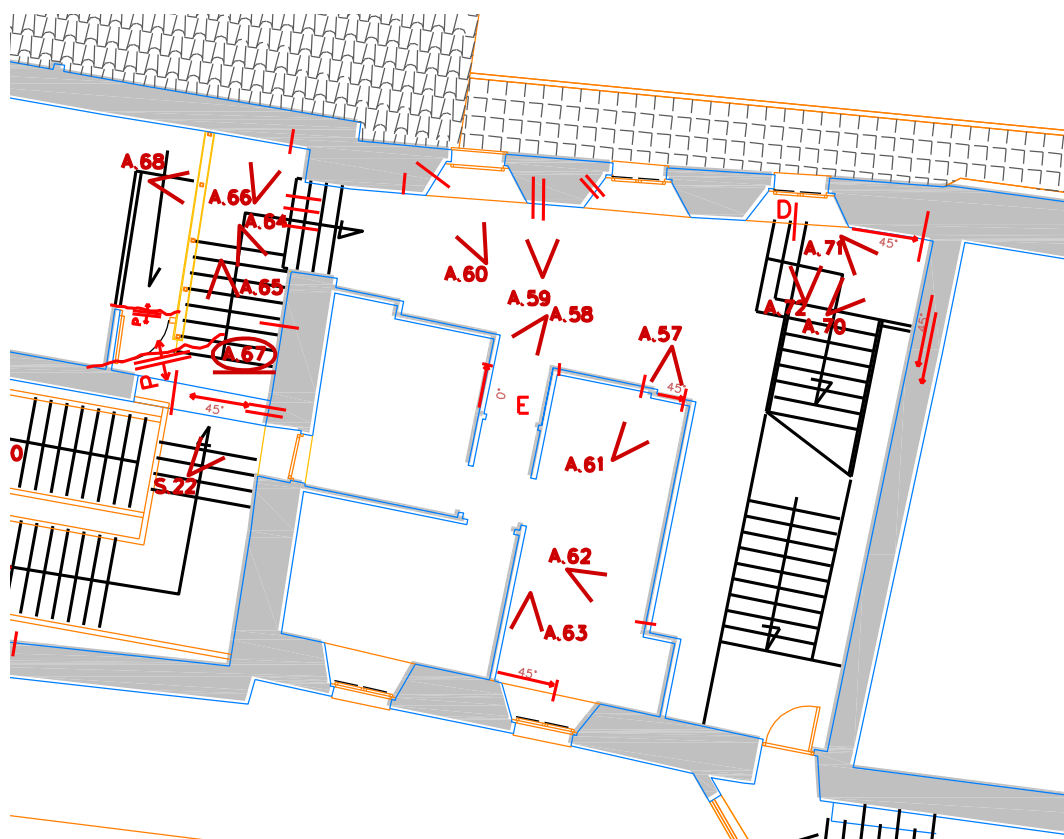


Figura 3.49 - Ubicazione della zona di cui al Punto 6





Figura 3.50 – Tessitura muraria delle pareti



Figura 3.51 - Appoggio della trave in legno sull'architrave in muratura di mattoni

7. Il vano scala indicato in Figura 3.52 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 3.53).

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 3.54). Il crollo è imputabile, come già detto, alla scarsa qualità della muratura ed alla mancanza di diafani 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 3.55) 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 3.56), la quale risulta localmente danneggiata proprio dal crollo stesso.

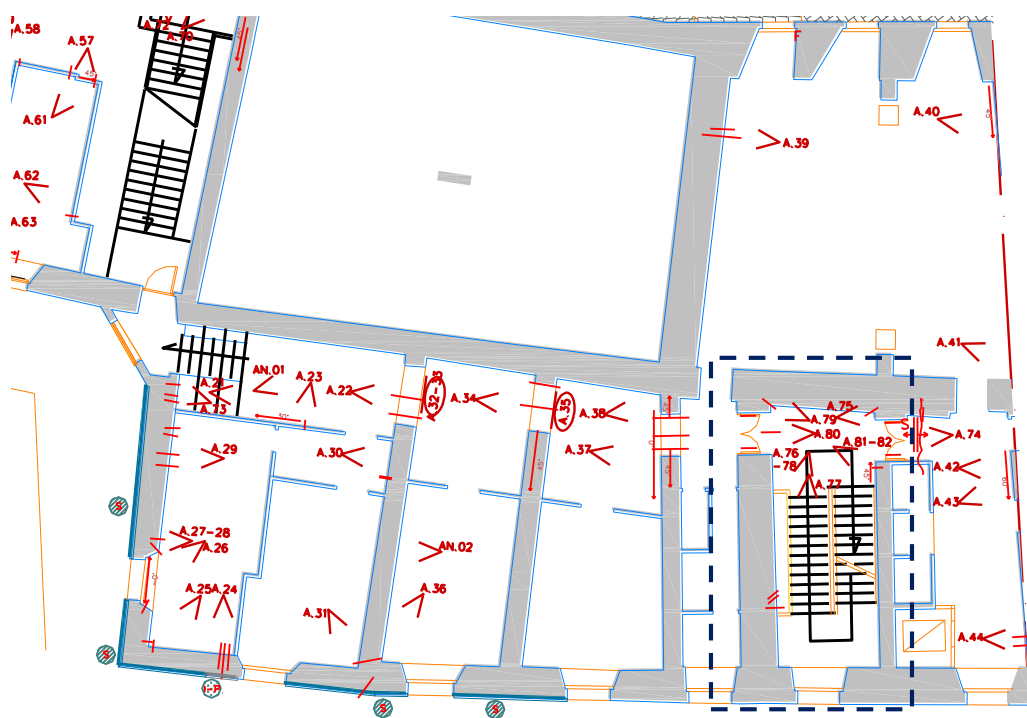


Figura 3.52 - Ubicazione del vano scala



Figura 3.53 - Dettaglio del collegamento puntuale della scala in legno alla parete e di un vano richiuso



Figura 3.54 - Crollo della parte alta della parete: è ben visibile la separazione tra i due paramenti murari e il riempimento in materiale sciolto



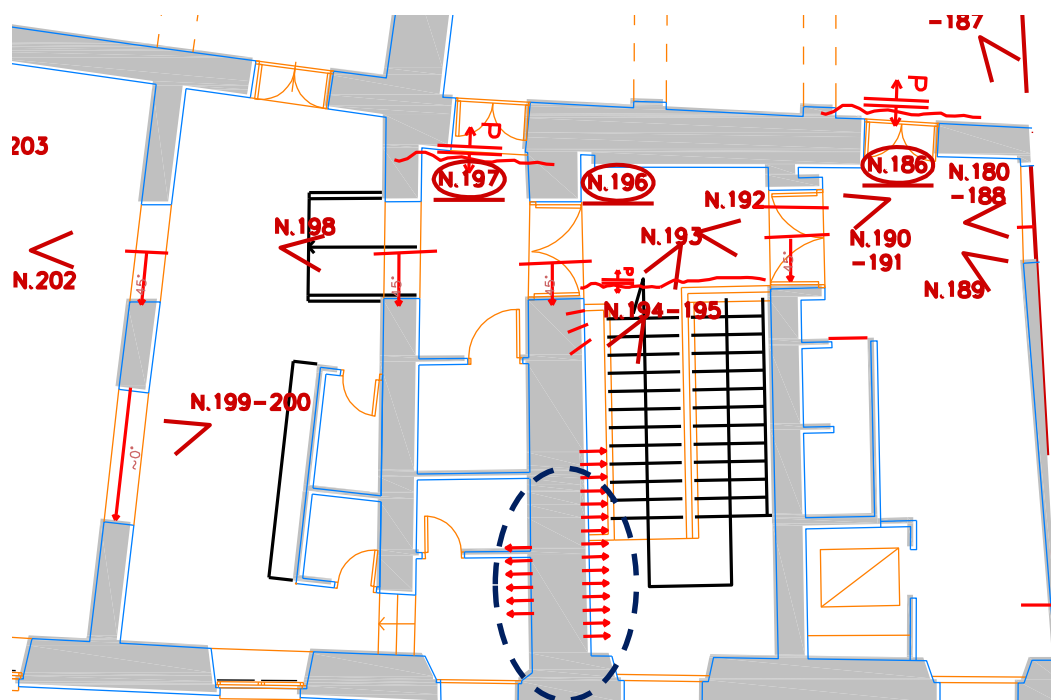


Figura 3.55 - Ubicazione della porzione interessata dal crollo al livello del piano Nobile



Figura 3.56 - 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 3.57 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 3.58); sulla parte alta delle pareti vicine, in corrispondenza degli appoggi delle travi in legno della copertura, sono inoltre presenti lesioni diffuse.

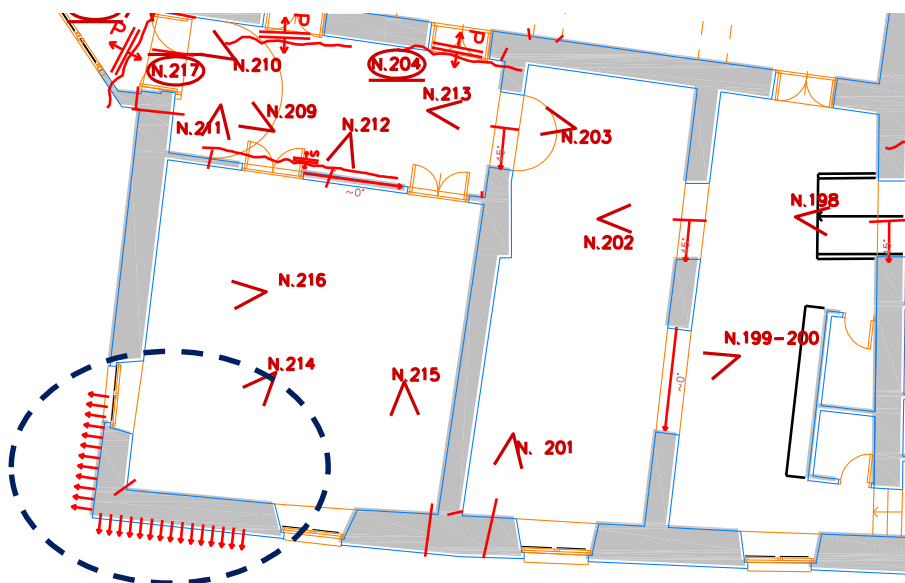


Figura 3.57 - Ubicazione dell'angolata crollata



Figura 3.58 - Crollo dell'angolata e messa in sicurezza dei VVF



40



Figura 3.61 - Quadro fessurativo degli archi del piano Ammezzato



Figura 3.62 - Quadro fessurativo degli archi del piano Nobile e messa in sicurezza da parte dei VVF

## 4 Piano di indagini

In questo capitolo si illustrano i rilievi e le 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 con le 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.

#### 4.1 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.

#### 4.2 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 3.1, ed ai quali si farà riferimento nel seguito.



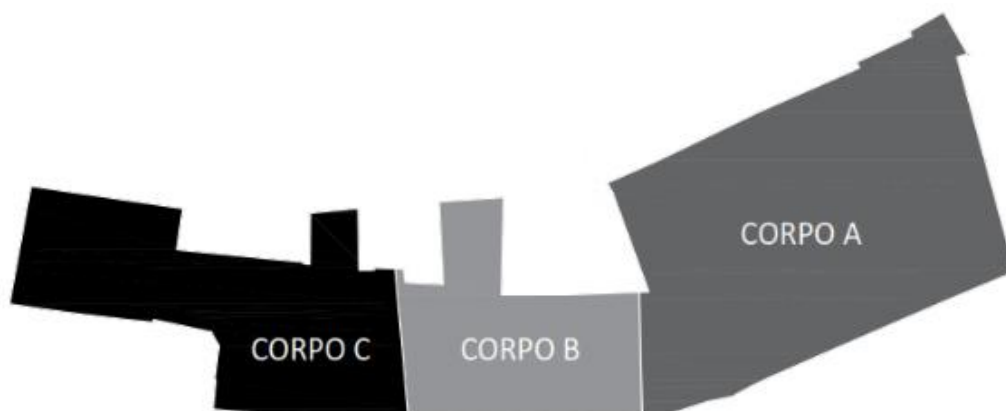


Figura 4.1 - Suddivisione del fabbricato per le indagini

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

#### 4.2.1 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.

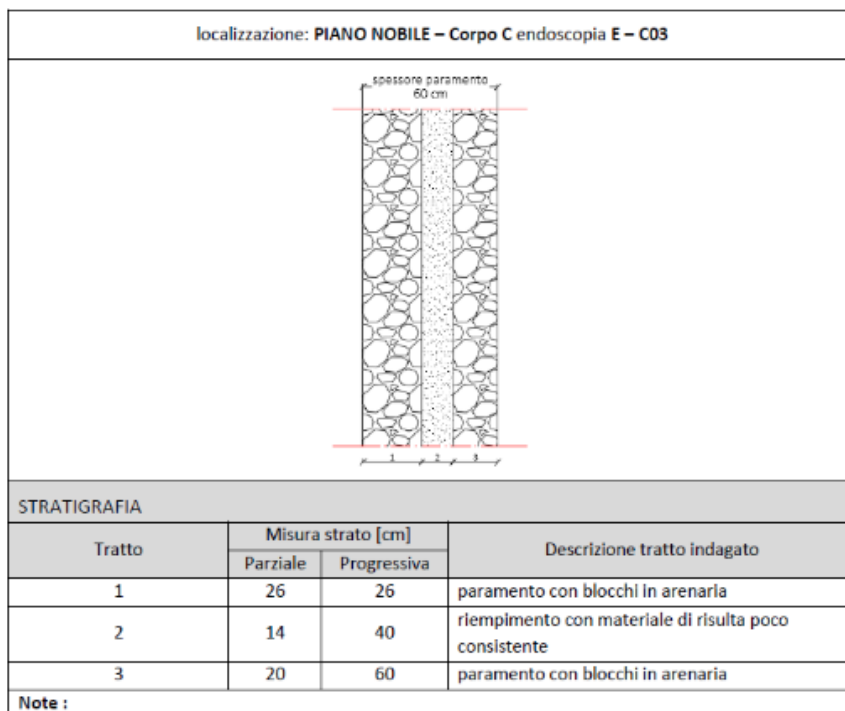


Figura 4.2 - Esempio di stratigrafia dei pannelli murari

In generale la tessitura delle pareti risulta molto caotica, caratterizzata da giunti di malta poco consistenti e irregolari, come mostrato in

Figura 4.3. 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 4.5 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 4.4).



Figura 4.3 - Rimozione di intonaco su una delle pareti perimetrali del Piano Nobile

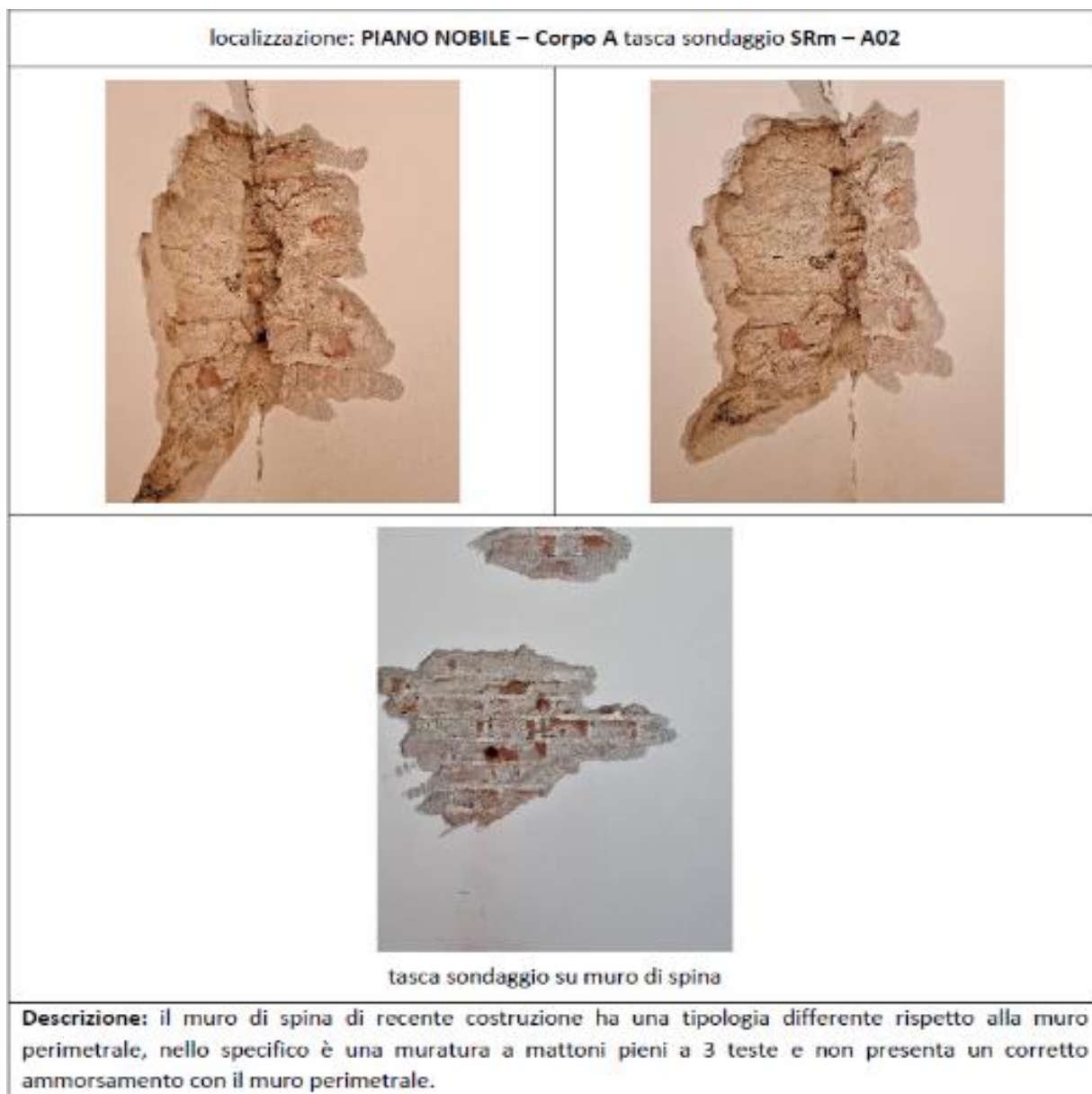


Figura 4.4 - Rimozione di intonaco in corrispondenza dello spigolo di collegamento tra due pareti di diverse epoche



Figura 4.5 - 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 4.6), completamente distaccato dal supporto in muratura (Figura 4.7).



Figura 4.6 - Rimozione di intonaco sulla parete interna lato Quadriportico





Figura 4.7 - 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 4.8 – Possibile meccanismo di ribaltamento della parete perimetrale visibile dalla fessura sulla pavimentazione

#### 4.2.2 Solai Corpo A

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

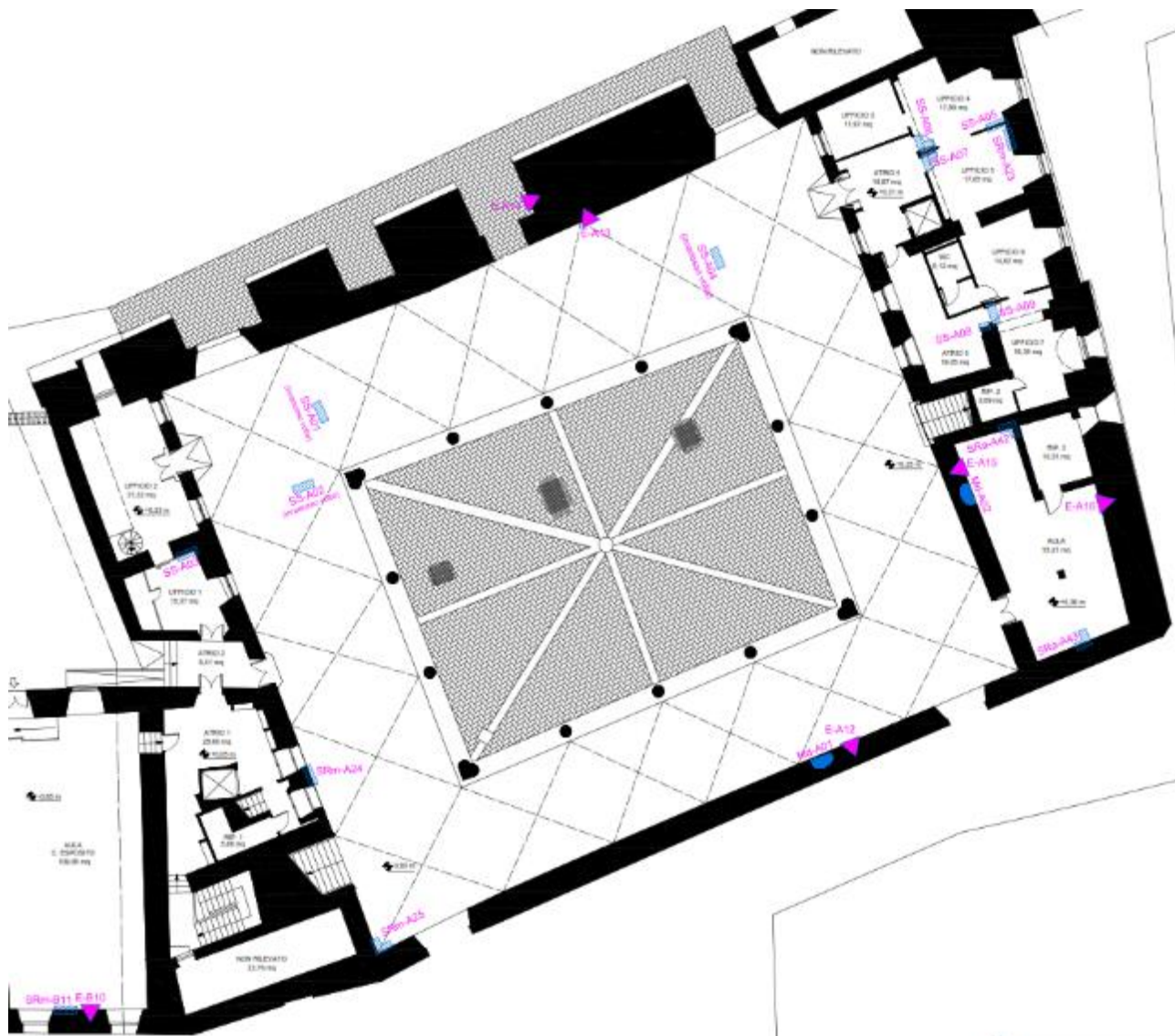


Figura 4.9 - Ubicazione indagini al Piano Strada (Corpo A)

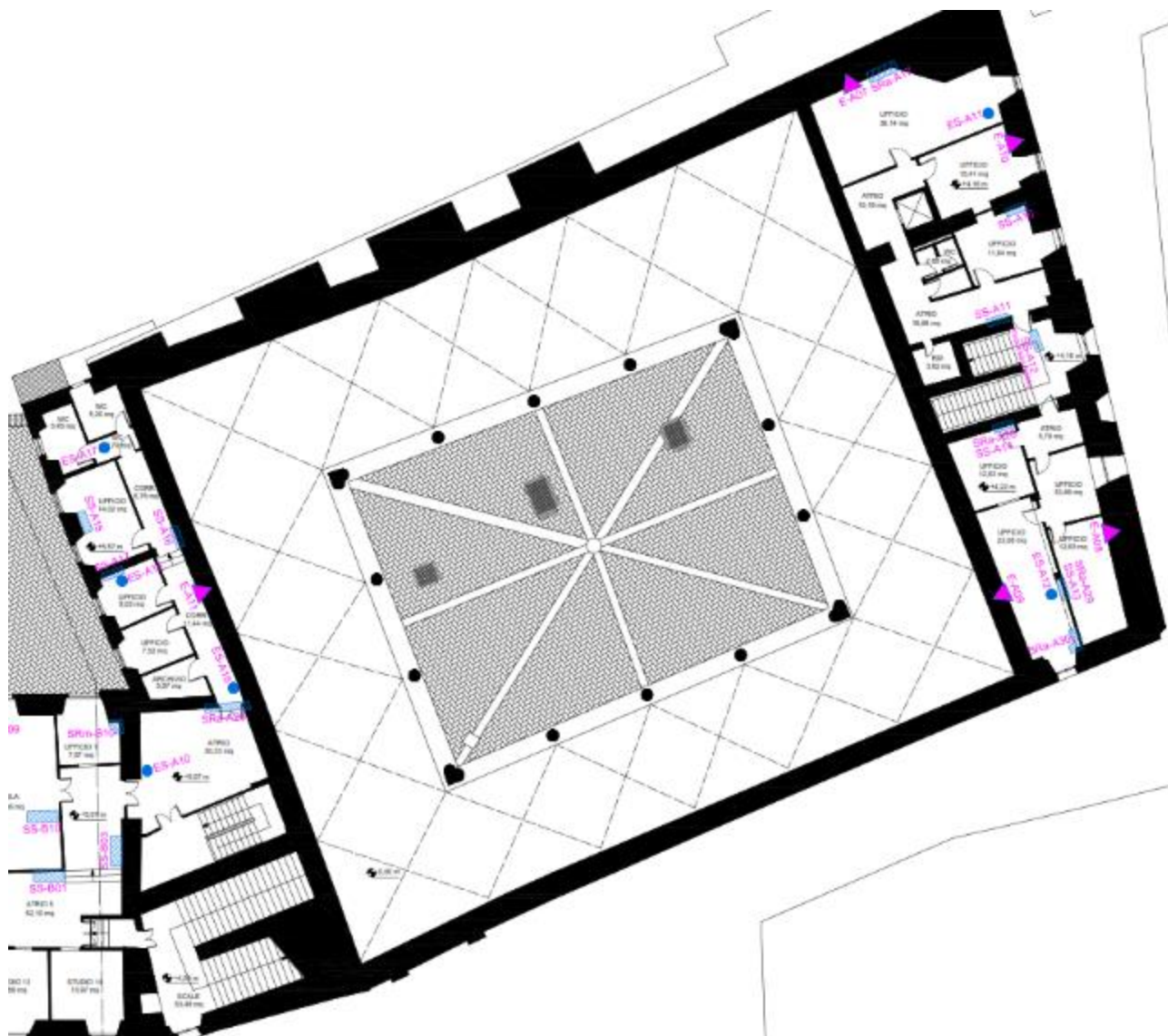


Figura 4.10 - Ubicazione delle indagini al Piano Ammezzato (Corpo A)





Figura 4.11 - 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 4.12).



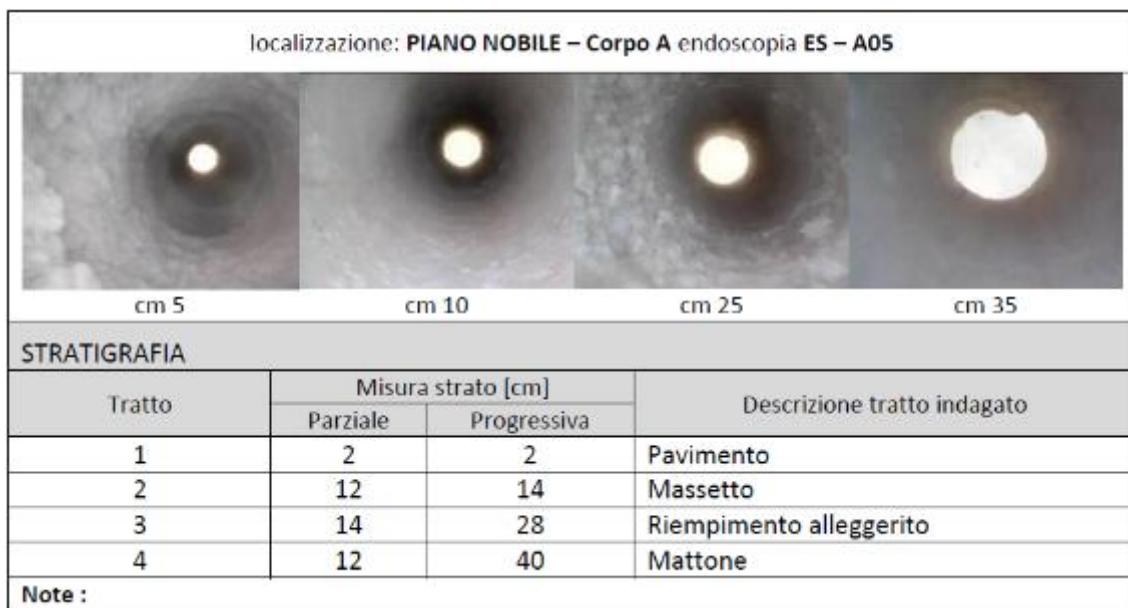


Figura 4.12 - Endoscopia eseguita in chiave ad una delle volte del Quadriportico

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 4.13).

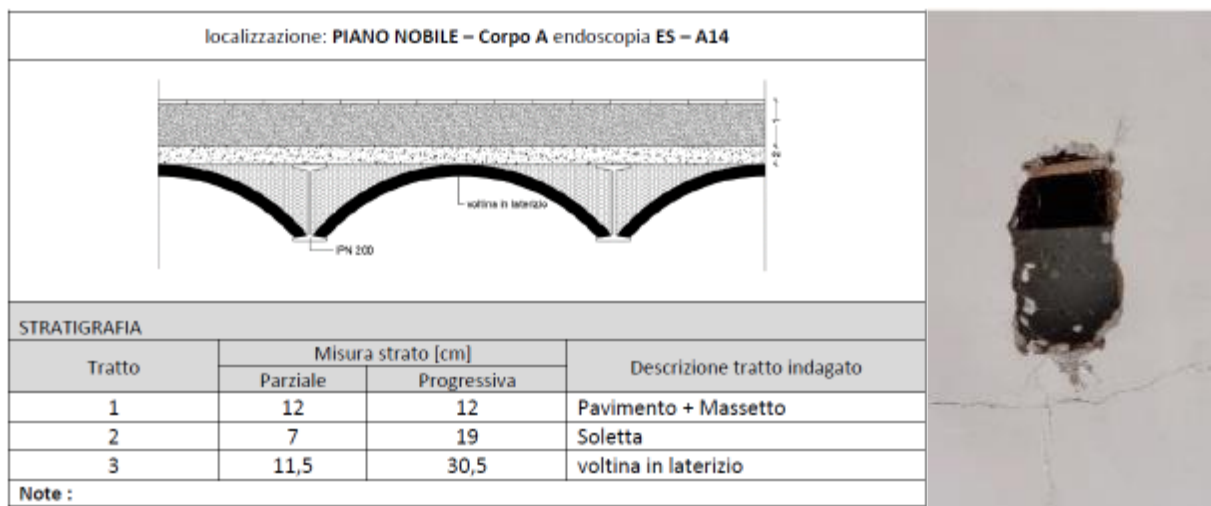


Figura 4.13 – Endoscopia e saggio locale sul solaio di calpestio del Piano Nobile sul lato orto botanico

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 4.14 e Figura 4.15).

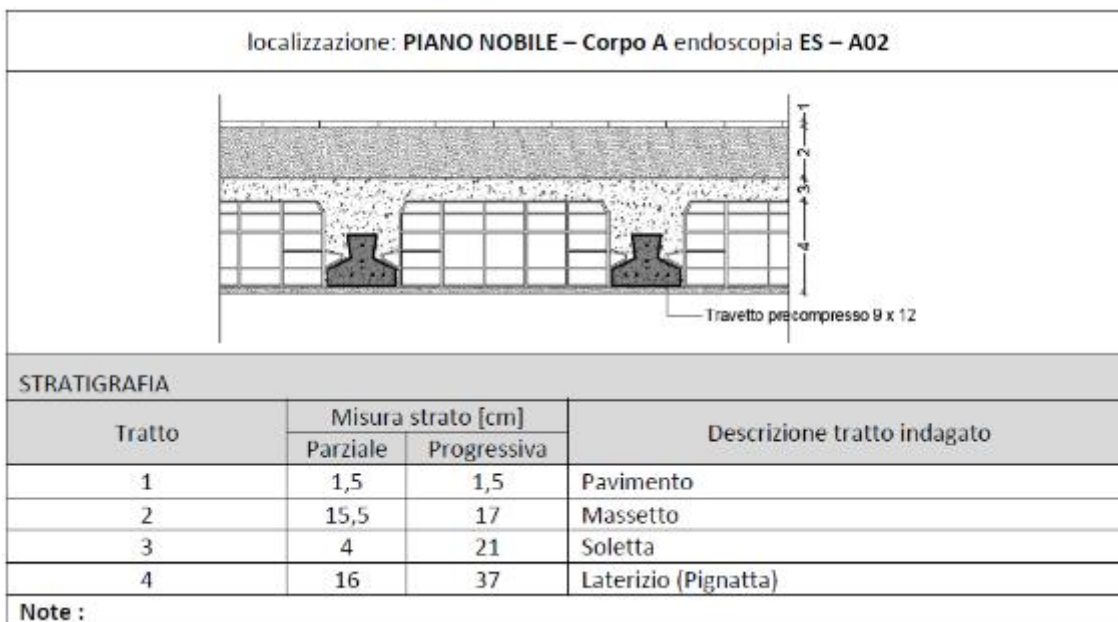


Figura 4.14 – Endoscopia sul solaio di copertura del piano Ammezzato



Figura 4.15 - 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 4.16 e Figura 4.17).

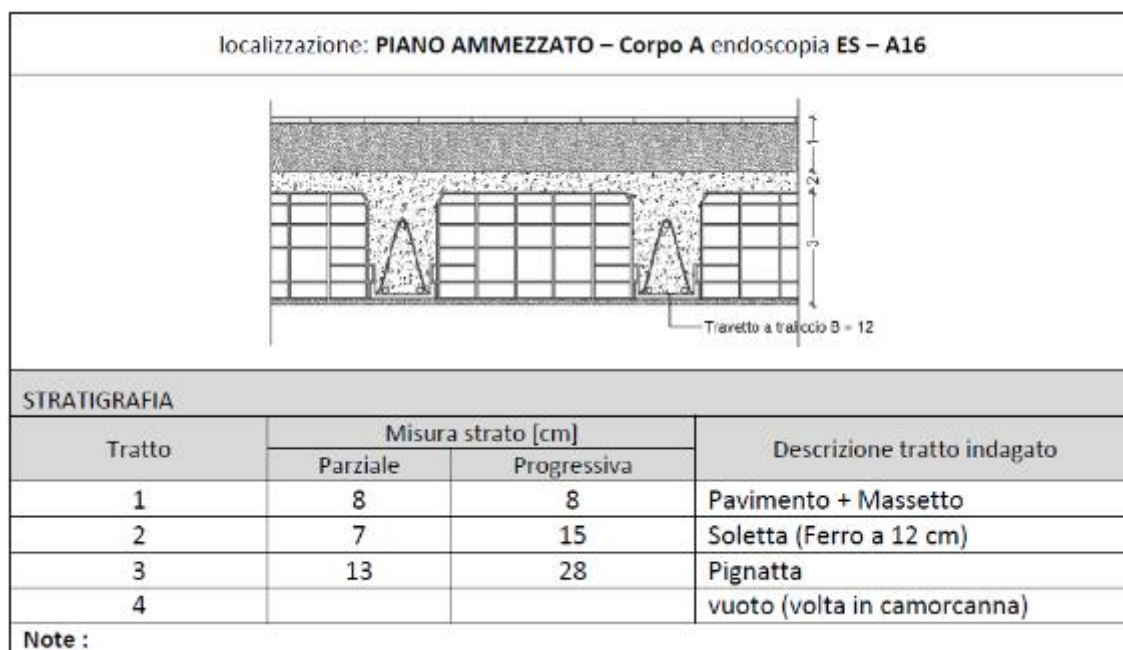


Figura 4.16 – Endoscopia sul solaio di calpestio del piano Ammezzato



Figura 4.17 - Rimozione intonaco all'intradosso del solaio di calpestio del piano Ammezzato

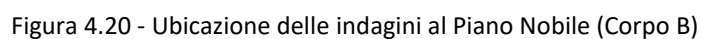
#### 4.2.3 Solai Corpo B

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



Figura 4.18 - 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 4.21, 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.

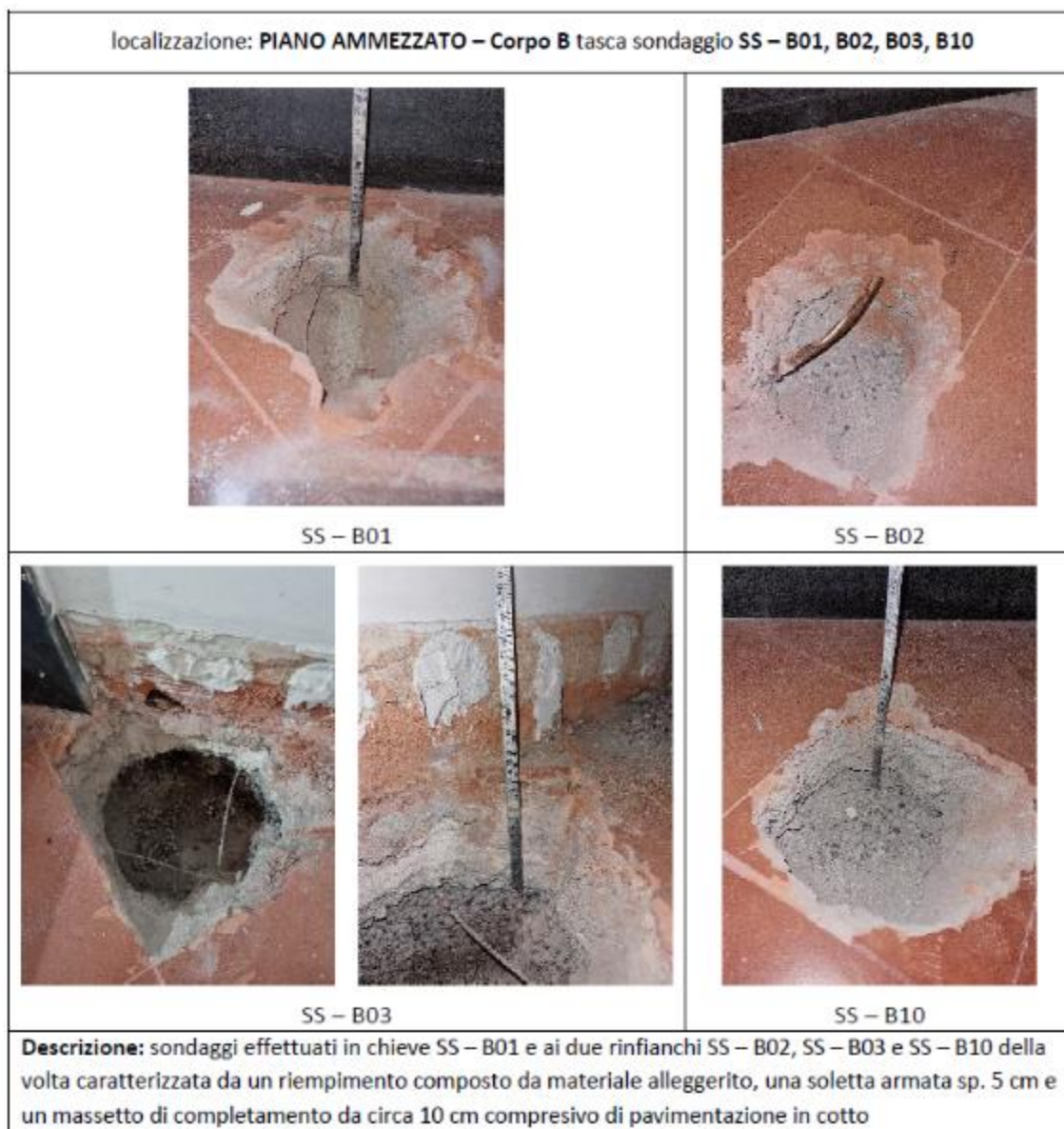


Figura 4.21 - Rimozione della pavimentazione all'estradosso delle volte a botte di copertura del Piano Strada

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



#### 4.2.4 Solai Corpo C

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



Figura 4.23 - Ubicazione delle indagini al Piano Strada (Corpo C)

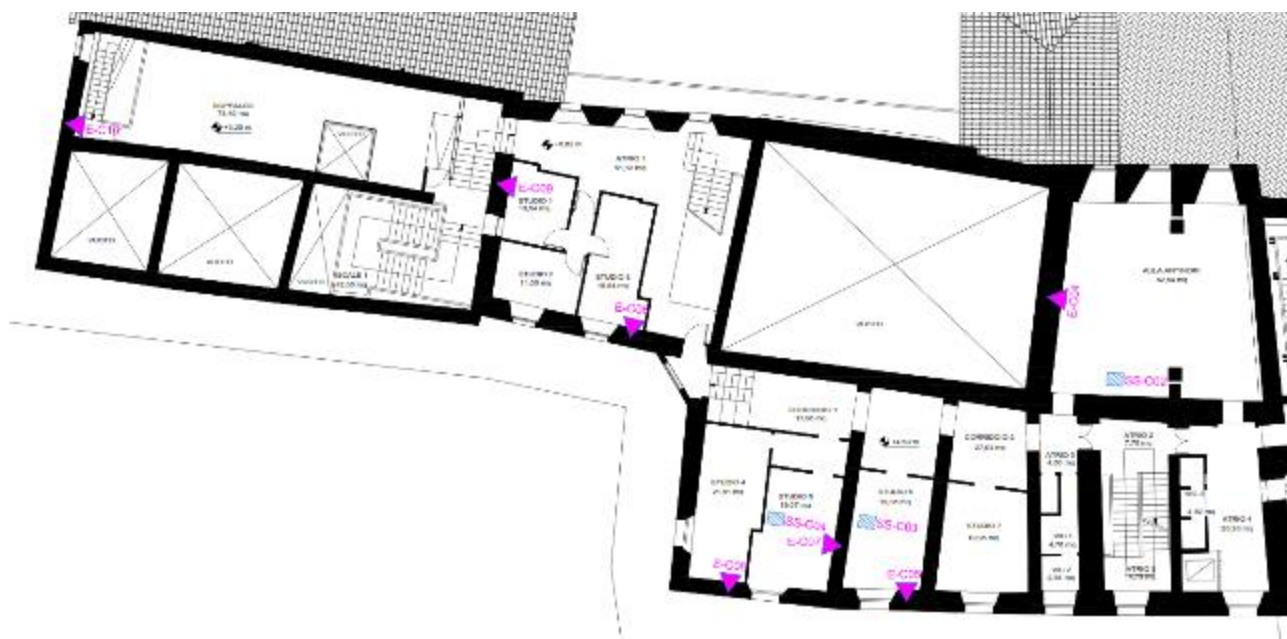


Figura 4.24 - Ubicazione delle indagini al Piano Ammezzato (Corpo C)



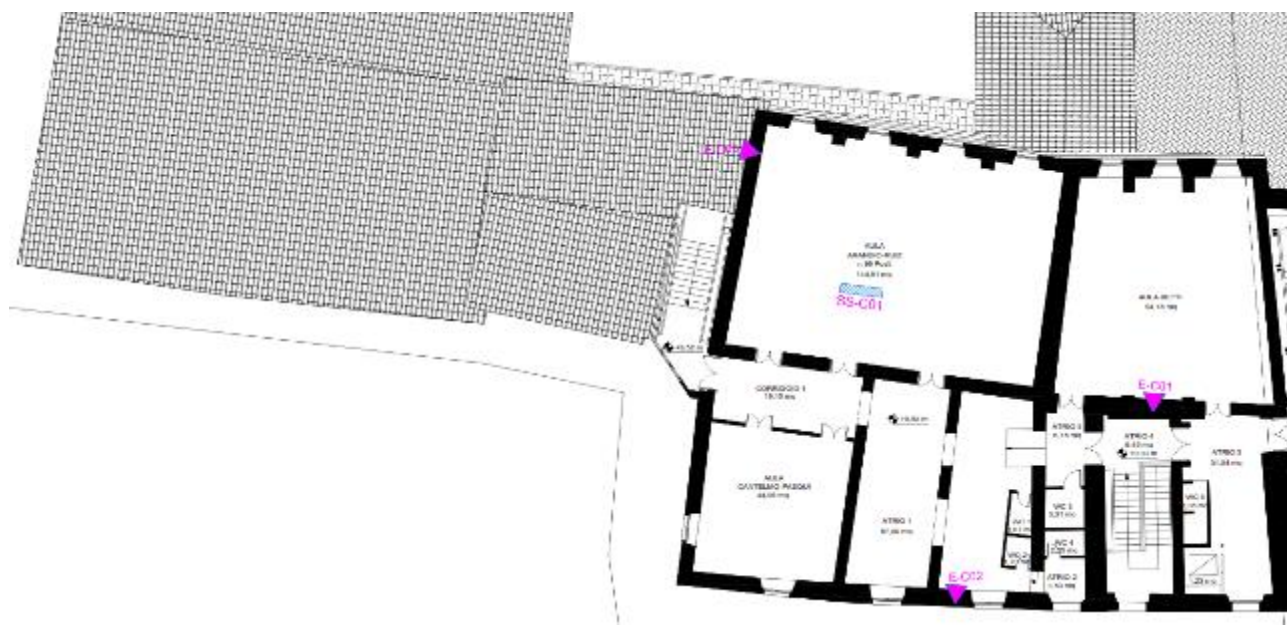


Figura 4.25 - Ubicazione delle indagini al Piano Nobile (Corpo C)

Il saggio locale eseguito all'estradosso del solaio dell'aula Arangio-Ruiz (solaio di calpestio nel Piano Nobile del Corpo C) mostra un solaio in travi di acciaio e tavelloni, come mostrato in Fig. 4.26, caratterizzato dall'assenza di una soletta armata al di sopra delle travi.



Fig. 4.26 - Rimozione locale della pavimentazione in corrispondenza dell'Aula Arangio-Ruiz al Piano Nobile del Corpo C

### 4.3 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 4.27 viene riportata la configurazione di riferimento dei martinetti e dei punti di lettura.

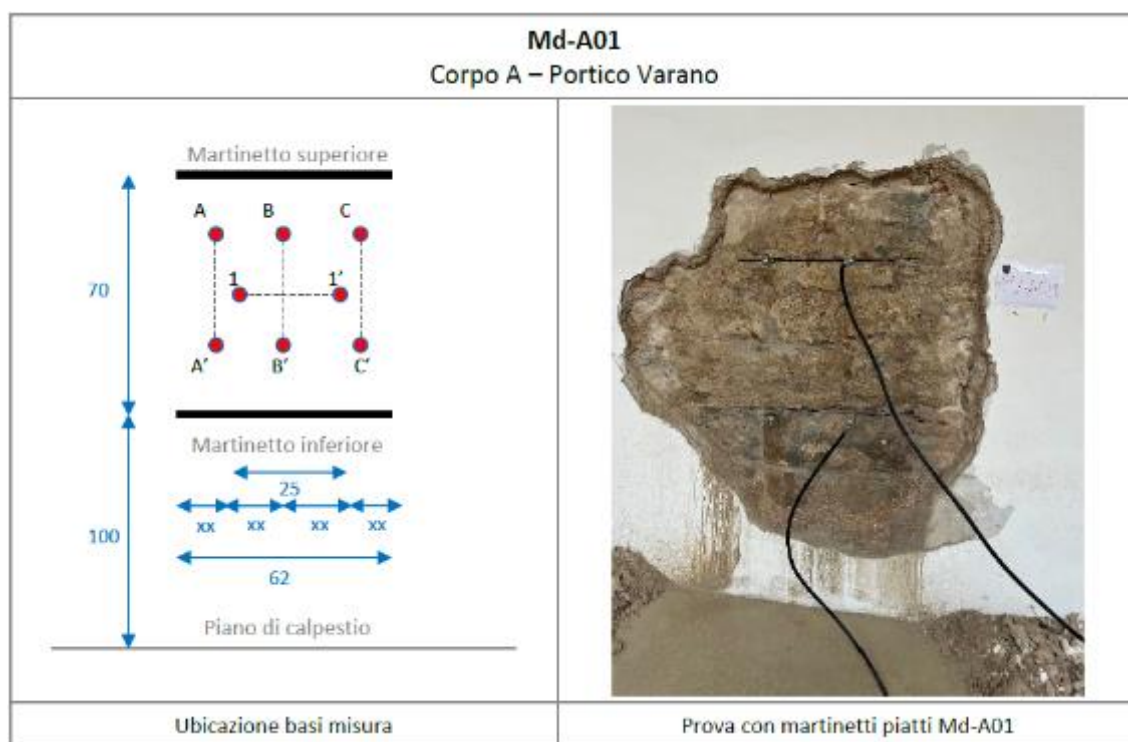
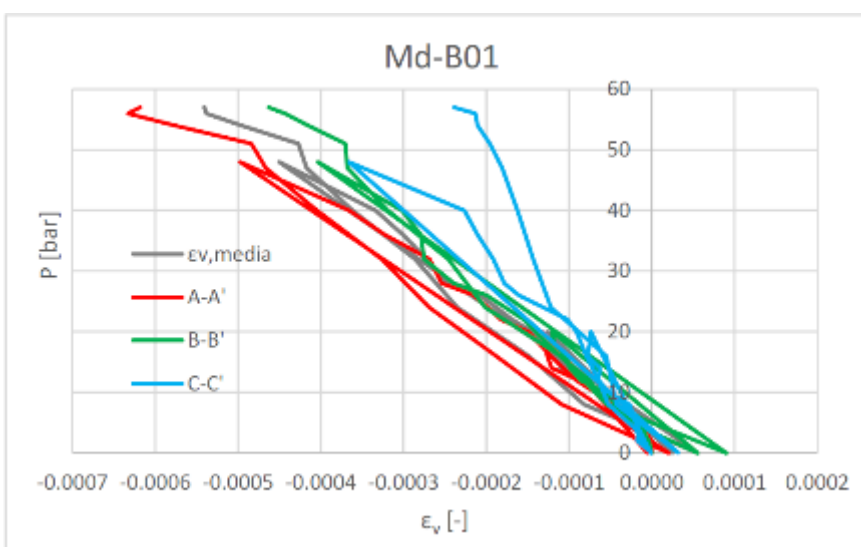
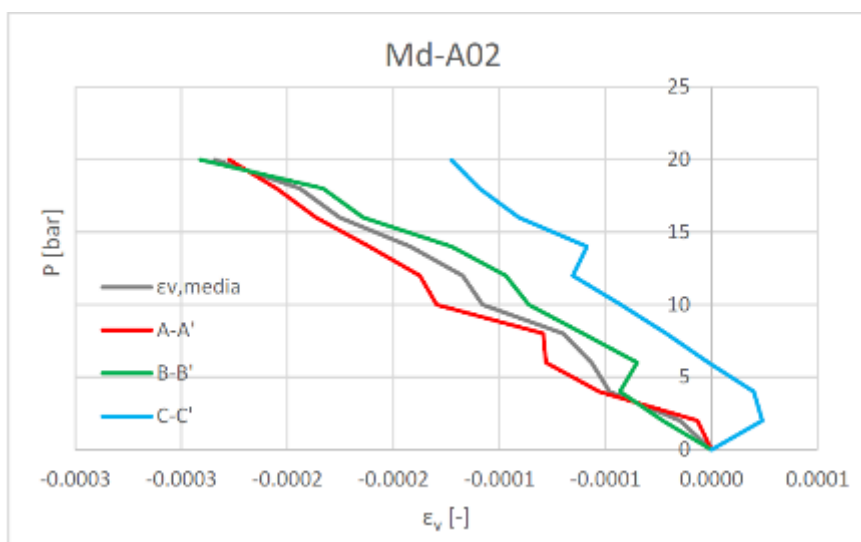
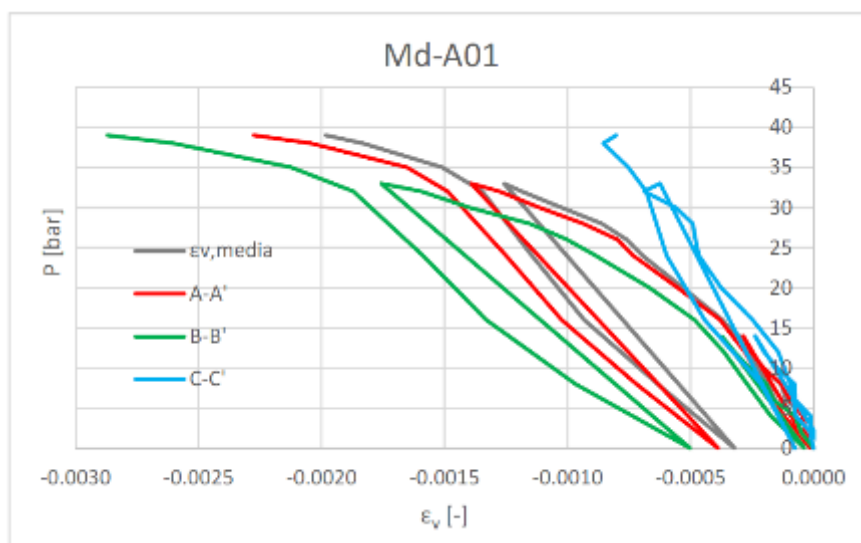


Figura 4.27 - Configurazione della prova tipo



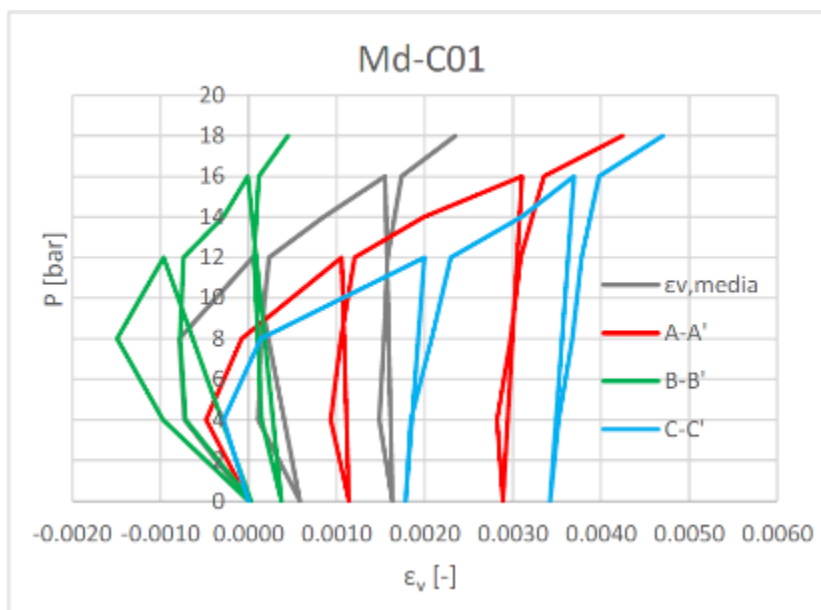


Figura 4.28 - Diagrammi sforzo-deformazione delle quattro prove eseguite

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 4.1, vengono riportati i valori della rigidezza 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 4.1 - Moduli elastici stimati dalla prova con martinetti piatti



#### 4.4 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 4.29 e Figura 4.30 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

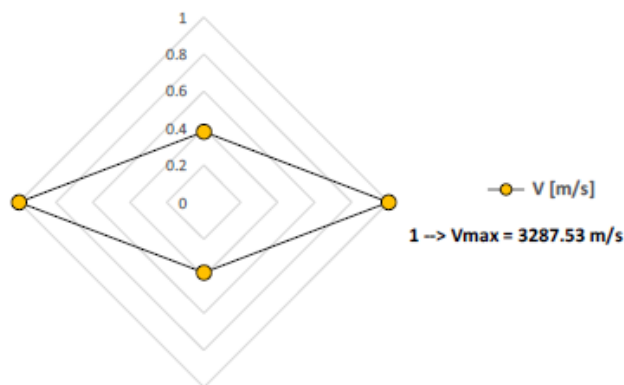


Figura 4.29 - Velocità degli ultrasuoni nella sezione di base di una colonna

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

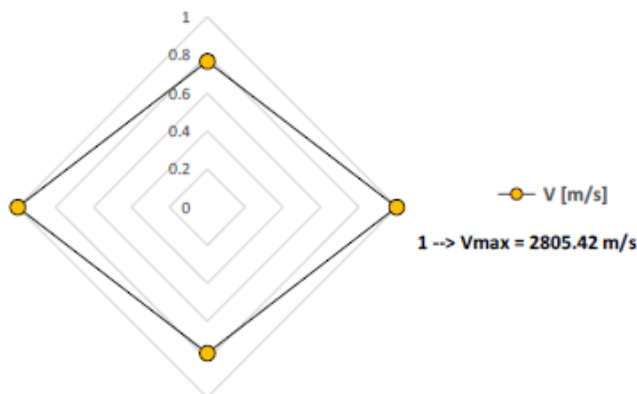


Figura 4.30 - Velocità degli ultrasuoni nella sezione di metà altezza della stessa colonna

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 4.2, 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 4.2, 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 4.2 - Risultati delle prove distruttive e non distruttive sulle carote di arenaria

#### 4.5 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 4.32).



Figura 4.31 - Il Quadriportico

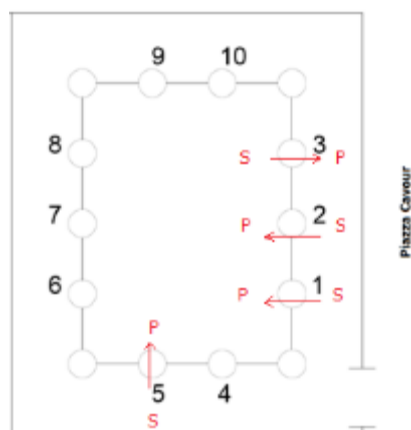


Figura 4.32 - Ubicazione delle colonne indagate con indagine radiografica

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).

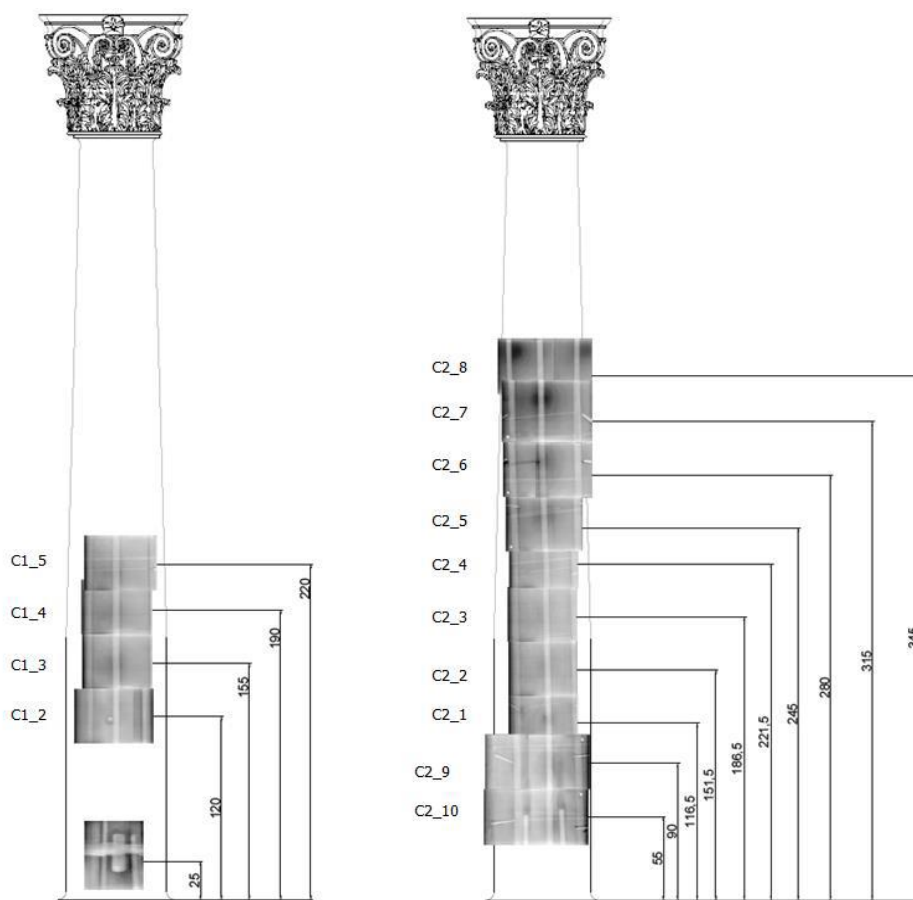


Figura 4.33 - Radiografie sulle colonne 1 e 2



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.

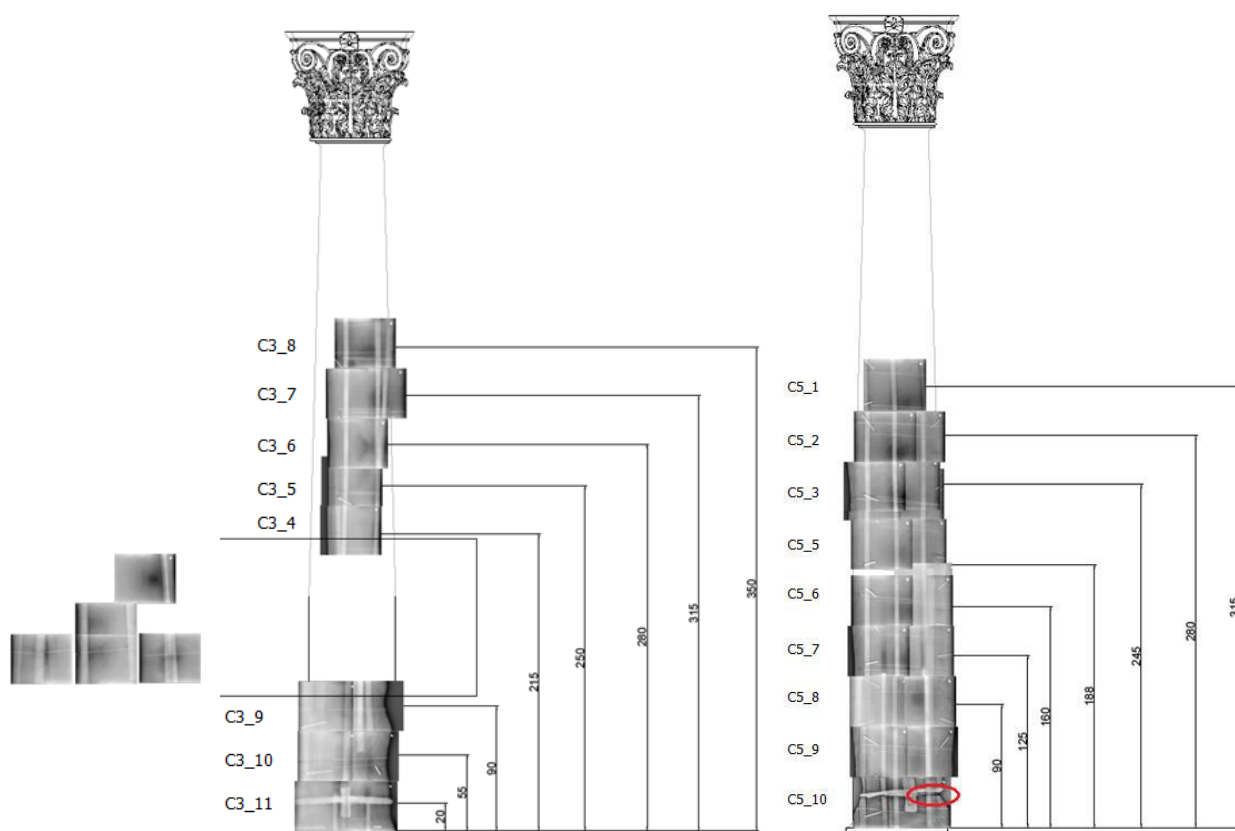


Figura 4.34 - Radiografie sulle colonne 3 e 5

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 4.35). Il numero di barre rilevate con le radiografie risulta pertanto coerente con lo schema di figura.

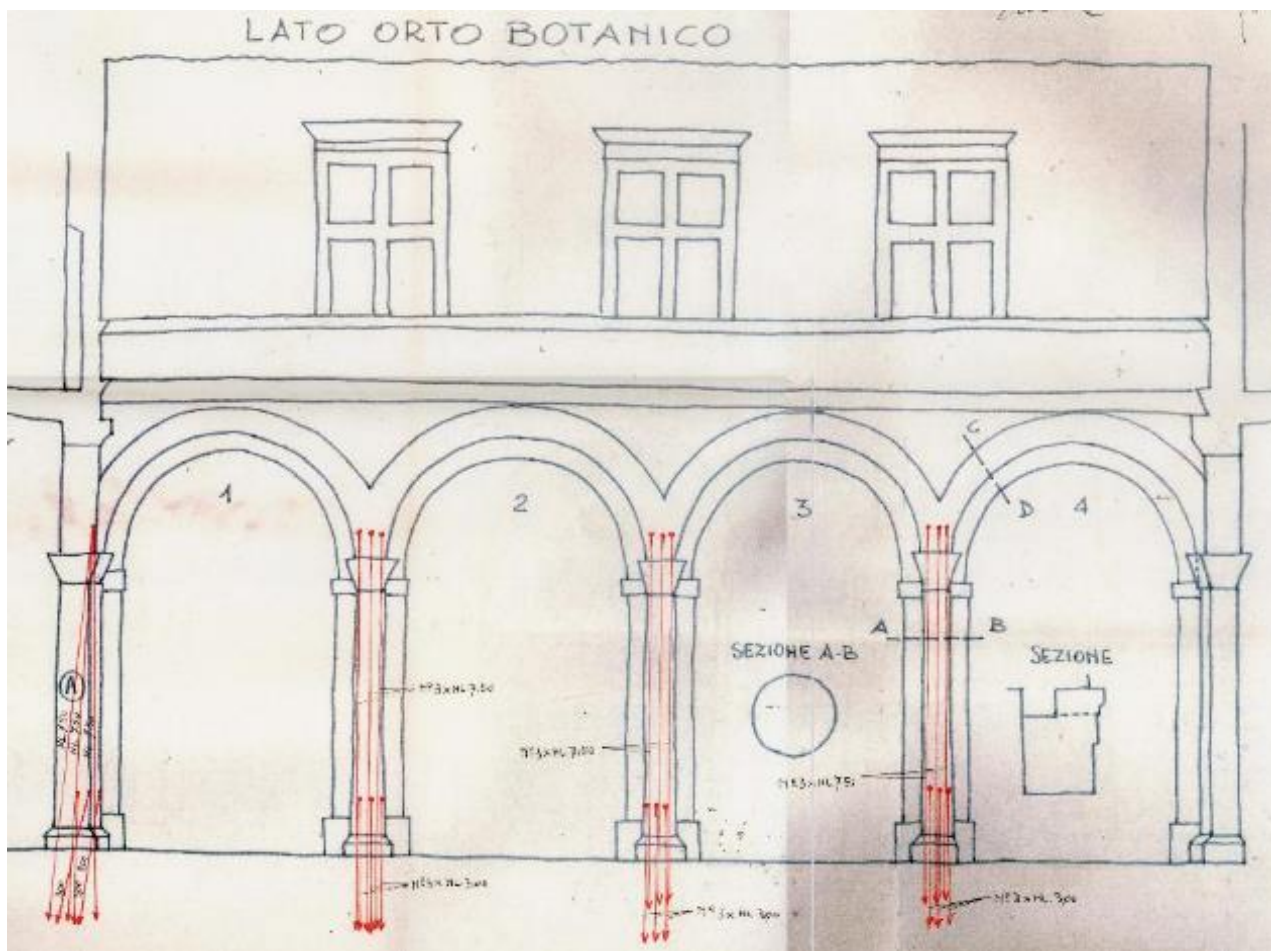


Figura 4.35 - Intervento di rinforzo delle colonne degli anni 70

#### 4.6 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.

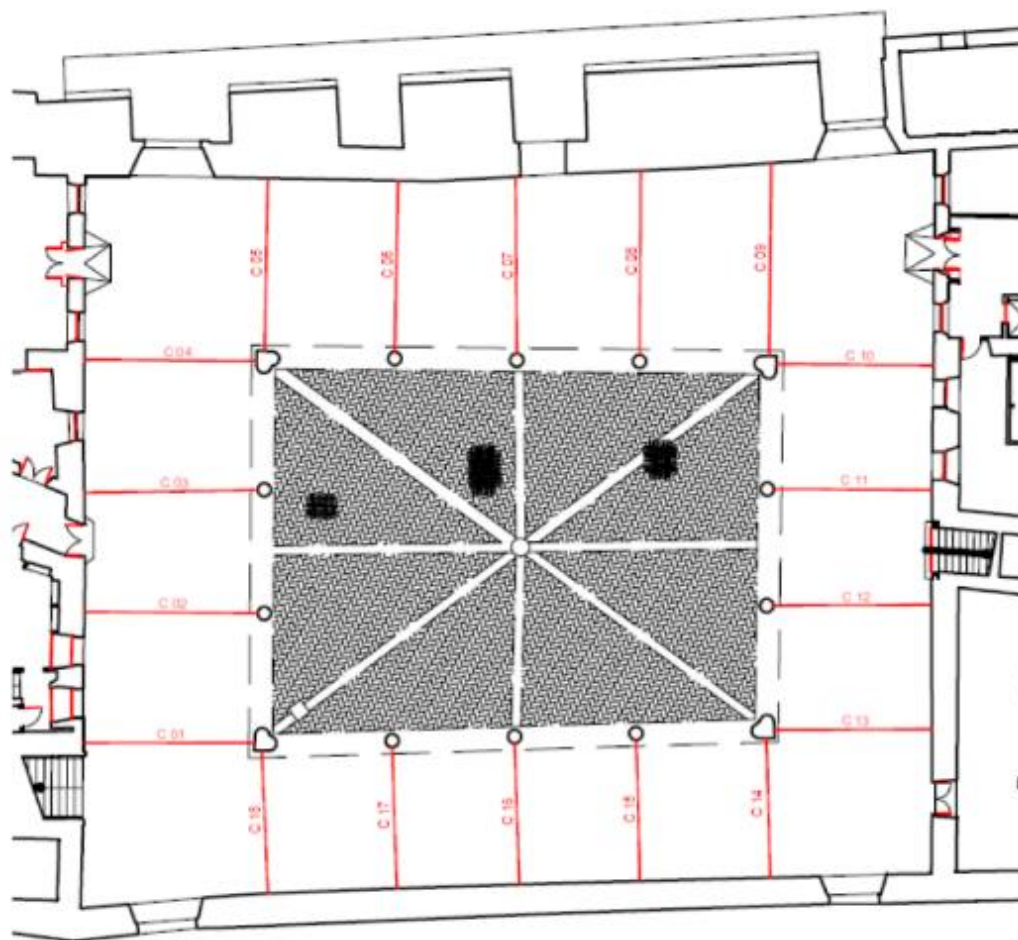


Figura 4.36 – Ubicazione catene indagate

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 4.3 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 4.3 - 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%.

#### 4.7 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.



#### 4.8 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 4.37, 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.

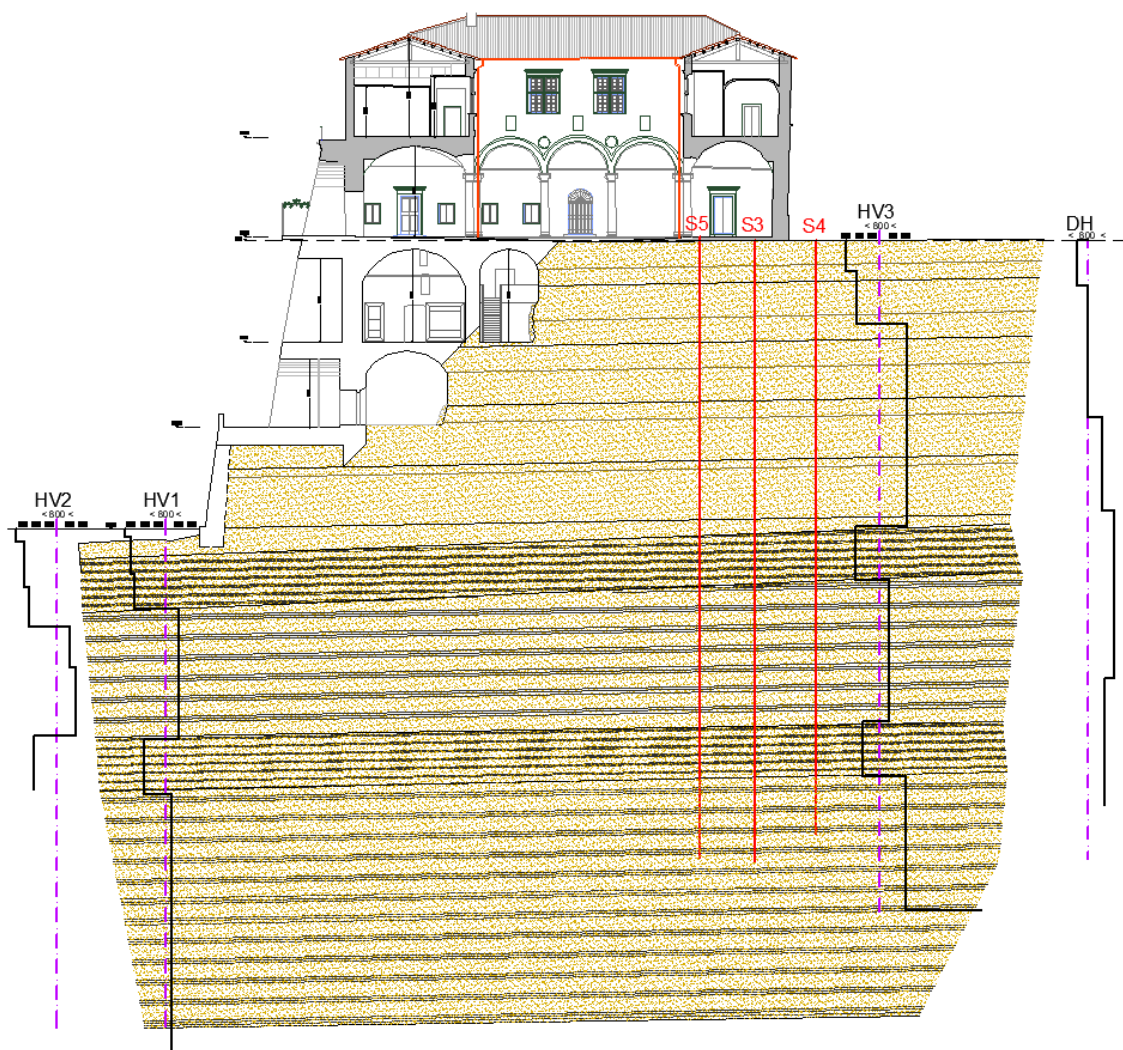


Figura 4.37 - Modello sismostratigrafico del terreno

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  $S_T = 1,0$ .