

# 5

---

Valutazione della vulnerabilità  
delle strutture oggetto di studio

---



La fase di indagine e di diagnostica, come già accennato nel primo capitolo, è stata funzionale alla successiva fase di analisi strutturale prevista dal progetto da cui questa tesi prende spunto, denominato “Verifica della sicurezza sismica dei musei statali”. Occorre premettere che questa parte, pur non essendo stata elaborata direttamente dall'autore di questa tesi, è frutto di una intensa collaborazione tra i diversi attori partecipanti al progetto, dai tecnici, ai professori e i loro collaboratori, allo stesso autore. Quindi la fase di analisi strutturale, pur essendo stata inserita per ragioni di completezza di informazione, verrà affrontata in maniera sintetica, non approfondendo questioni che richiedono competenze specifiche di ambito ingegneristico di sicurezza in zona sismica.

In ogni caso l'analisi strutturale, come la fase di indagine, doveva seguire le indicazioni date dalle normative affrontate nel primo capitolo, cioè le NTC del 2008, la Circolare del 2009 e le Linee guida del 2010. In particolare, si farà riferimento alla determinazione dei fattori di confidenza richiesti dalle normative per l'impostazione delle analisi strutturali rispondenti ai livelli LV1, LV2 e LV3.

Il livello di valutazione 1, semplicemente indicato come LV1, consiste in una valutazione della sicurezza sismica tramite l'utilizzo di metodi semplificati ma sufficienti a definire un indice di sicurezza. Nel nostro caso, il MiBACT ha messo a disposizione delle università uno strumento denominato SIVARS, in modo da ottenere, in linea teorica, dei risultati attraverso una metodologia comune a livello nazionale. Questo software fornisce un indice di sicurezza sismica tramite una procedura guidata e una compilazione per punti. Il programma è costituito da una successione di schede preimpostate dove

è necessario inserire nei vari campi delle indicazioni relative alle caratteristiche dell'edificio oggetto di analisi. Per quanto riguarda i valori richiesti per alcuni dei campi da compilare, può essere necessario sia rivolgersi alla letteratura e alle normative, che ai risultati ottenuti in fase di indagine. Proprio per questo motivo è stato necessario, fin da questo livello di analisi seppur basilare, un continuo confronto e una continua collaborazione tra le diverse figure coinvolte, dato che in molti casi si sono dovute desumere informazioni specifiche inizialmente non emerse durante la fase di sopralluogo e in quella successiva di verifica del rilievo geometrico.

Il livello di valutazione 2, indicato come LV2, consiste invece in una valutazione della sicurezza sismica di singole parti strutturalmente autonome dell'edificio (definite come macroelementi), che nel nostro caso sono quelle identificate come maggiormente problematiche. Per questo tipo di processo solitamente ci si riferisce a modelli locali, esposti in maniera abbastanza esauriente nelle diverse normative di riferimento. L'analisi da preferire, che è anche quella utilizzata nel nostro caso, è quella cinematica, lineare o non lineare, che intrinsecamente richiede un livello di conoscenza dei dettagli costruttivi della porzione analizzata piuttosto alto per ottenere risultati soddisfacenti e realistici. Proprio per questo, anche nella valutazione LV2, il risultato è frutto di un'interazione continua tra chi ha analizzato i meccanismi e chi ha invece condotto le fasi di indagine. Come vedremo, infatti, è stato necessario uno studio approfondito delle strutture oggetto delle analisi, sia attraverso ragionamenti sui risultati ottenuti nella prima fase sia attraverso approfondimenti maturati attraverso la consultazione di letteratura specifica sulle strutture storiche, in modo da ottenere un quadro abbastanza fedele delle tecniche costruttive locali.

Il livello di valutazione 3, indicato come LV3, fornisce un quadro globale della sicurezza sismica dell'edificio, e deve perciò riguardare la costruzione nel suo complesso. Per effettuare questo tipo di valutazione sono possibili due diversi approcci: il primo è quello di dividere l'edificio, come nel livello 2, in diverse porzioni strutturalmente autonome, i macroelementi, analizzandole con gli stessi strumenti utilizzati nel livello precedente avendo però cura di ripartire nella maniera corretta le azioni sismiche per ciascuna di esse; il secondo approccio è quello invece di utilizzare modelli globali che considerino l'edificio nella sua totalità. Nel nostro caso si è preferito il secondo approccio ricorrendo ad un software

commerciale, denominato Tremuri, basato sulla trasposizione dello schema strutturale dell'edificio in telai equivalenti. Come nei casi precedenti, il corretto esito di questa analisi, fin dalla schematizzazione delle strutture, dipendeva dalla corretta interpretazione dei risultati ottenuti dalla fase investigativa: la completezza delle informazioni riguardanti le proprietà meccaniche delle strutture è infatti emersa per merito di valutazioni comparative dei risultati delle prove, facendo in modo di mettere in relazione tra loro i singoli contributi di ciascuna indagine per comprendere il comportamento dell'edificio dal punto di vista strutturale.

## 5.2

### Interpretazione strutturale dell'edificio

Come abbiamo più volte evidenziato, la fase di indagine è stata determinante nella successiva fase di valutazione sismica, soprattutto per quanto riguarda la produzione dei modelli di calcolo. Appare quindi necessario effettuare una breve ma esaustiva sintesi dei risultati ottenuti, in modo da rendere chiare le motivazioni che hanno guidato a certe scelte che verranno di seguito esposte.

L'edificio principale di Villa Pignatelli è una costruzione storica in muratura risalente alla metà del diciottesimo secolo, costruita prevalentemente secondo le tecniche in uso al tempo.

Per le **fondazioni**, data la mancanza di indagini approfondite, si è effettuato uno studio su edifici con probabili caratteristiche simili, ipotizzando così la presenza di una fondazione continua costituita da tre strati di diversa costituzione (malta e scorie laviche a livello inferiore, malta e pietra pomice a superficie scabra a livello intermedio, malta e conci di pietra a livello superiore).



5.1. Schema tipo di fondazione utilizzato come riferimento (vedere capitolo 3, paragrafo 3 per dettagli)

Le **murature portanti** storiche sono costituite da blocchi squadrati di tufo di Piperno, di misura variabile, che vanno a costituire setti verticali a spessore decrescente con il salire dei piani. Al piano seminterrato lo spessore è abbastanza variabile, oscillante tra circa 1 e 1,6 metri, dato che in questo caso i setti portanti sono stati oggetto di interventi conseguenti alla conversione ad uso museale del piano. Infatti negli anni novanta questo piano è stato profondamente modificato, con l'espansione del corridoio perimetrale e il conseguente rinforzo delle contigue murature con un sistema misto in cemento armato e blocchi di laterizio, oltre a diversi altri interventi come i setti in cemento armato nel vano ascensore. Le aperture sono costituite da passaggi tra i diversi ambienti e bocche di lupo verso l'esterno, dove i primi sono stati anch'essi oggetto di rinforzo strutturale in acciaio o cemento armato. Delle aperture ad arco tra i diversi ambienti si ha una termografia che evidenzia la presenza

all'intradosso di una fila di mattoni pieni.

Al piano superiore, il rialzato, lo spessore della muratura si riduce a circa 0,8 metri, con l'aggiunta di elementi verticali come colonne in marmo o muratura a sostenere comunque carichi abbastanza ridotti. Le aperture sono identificabili in passaggi tra i diversi ambienti e in grosse finestrate verso l'esterno e verso gli ambienti verandati.

Nei piani superiori, il primo e il sottotetto, lo spessore si riduce ulteriormente, arrivando a circa 0,6 metri, con sistemi di aperture simili a quelli già incontrati nel piano rialzato. Oltre ad una diminuzione di spessore, con il salire dei piani è presente anche una diminuzione del numero di setti, a causa delle diverse esigenze spaziali.

La tessitura muraria, verificata in diversi punti del piano seminterrato (nicchie, sala I6 e I10) e del sottotetto (ambienti meridionali) sia attraverso una visione diretta sia attraverso indagini termografiche, è risultata piuttosto regolare, uniforme, e relativamente conforme alla "regola d'arte". Gli ammorsamenti tra i setti verticali, verificati tramite rimozione dell'intonaco in due diversi punti del piano seminterrato, si sono rivelati correttamente eseguiti; inoltre le indagini soniche, effettuate in tre diversi pareti, hanno mostrato valori vicini ai 1000 m/s che sono indicatori di un corretto ammorsamento anche tra i diversi paramenti che costituiscono la sezione muraria.

Per quanto riguarda gli orizzontamenti, al piano seminterrato abbiamo a livello di solaio inferiore un vespaio areato realizzato negli anni'90 con filari paralleli di mattoni pieni, poggiante su un massetto in cemento armato; come copertura degli ambienti troviamo un sistema di volte strutturali in muratura con diverse tipologie (crociera, botte, cupola), la maggior parte delle quali fortemente ribassate e in alcuni casi anche deformate. Come per le murature perimetrali è importante segnalare le modifiche che sono state effettuate negli anni novanta, con la cementazione armata o semplice di molte volte, oltre al taglio e al successivo rinforzo con sistemi misti in acciaio e cemento armato della volta in corrispondenza della scala di collegamento con gli ambienti superiori. Questi tipi di interventi, soprattutto quelli riguardanti le volte, sono stati oggetto di una riflessione critica perchè rivelatesi estremamente dannosi in caso di sisma: infatti la cappa così applicata va' a costituire una massa rigida in elevazione e tende a crollare monoliticamente con conseguenze piuttosto gravi per il bene storico e



5.2. Rilievo dello spessore del solaio sottostante la Sala verde tramite l'utilizzo di un transponder

le persone. Inoltre si è notato che molto spesso più che irrigidire la volta e rinforzarla, i consolidamenti mediante cappe armate vadano a costituire un ulteriore carico perchè non correttamente collegati alle murature perimetrali. Quindi una possibile interpretazione della geometria non regolare, osservabile facilmente dalle ricostruzioni ottenute con la stazione totale, è quella che le deformazioni siano causate proprio dagli interventi di rinforzo. Tra le volte è stata studiata quella a crociera della sala I10, attraverso due endoscopie (reni+chiave) e un rilievo dello spessore del solaio in chiave attraverso l'uso del transponder, preceduto da un altro controllo attraverso l'uso di un disto laser (effettuato però dalla sala I9 di altezza simile); l'endoscopia ha evidenziato la presenza di una doppia fila di mattoni (20 cm rilevati più almeno altri 18 cm alle reni, 20+8 cm in chiave), mentre il rilievo dello spessore in chiave ha restituito un valore vicino ai 0,5 metri. Un altro punto interessante è rappresentato dalla presenza, in diversi casi (sala I3, I6, I12), di archi di rinforzo alle volte, posizionati all'intradosso e risalenti ad un periodo imprecisato. Uno di questi, quello della sala I12, è stato analizzato tramite due endoscopie, una verticale e una orizzontale, di profondità 40 cm, che hanno messo in evidenza la presenza di una doppia fila di mattoni (endoscopia verticale, circa 8 cm + almeno altri 30cm). Altre due strutture ad arco, quello della sala I3 e quello della sala I6, sono state oggetto di indagine sonica in trasparenza che ha messo in luce nel primo caso una fila di mattoni pieni all'intradosso seguito da una muratura meno regolare, nel secondo una struttura composta esclusivamente in mattoni pieni.

Al piano rialzato invece abbiamo una situazione abbastanza complessa da decifrare, a causa della massiccia presenza di finte volte su telaio ligneo. In ogni caso si è arrivati a dichiarare la compresenza di volte strutturali in muratura (a padiglione, a botte, a cupola), un caso di solaio piano in putrelle metalliche (nella Sala da pranzo), una copertura in travi in acciaio (nella Veranda neoclassica) e un sistema di travi in legno (nei Portici in facciata).

Al piano primo vengono abbandonate completamente le volte strutturali in favore di un sistema di travi in legno, rinforzato secondo alcuni documenti con l'inserimento di travi in acciaio; inoltre è individuabile anche un caso di sostituzione dell'antico sistema con uno completamente nuovo in travi in acciaio (al di sotto degli impianti nel piano del sottotetto).

Il sistema di copertura presente nel sottotetto invece è formato da capriate lignee di diversa tipologia,

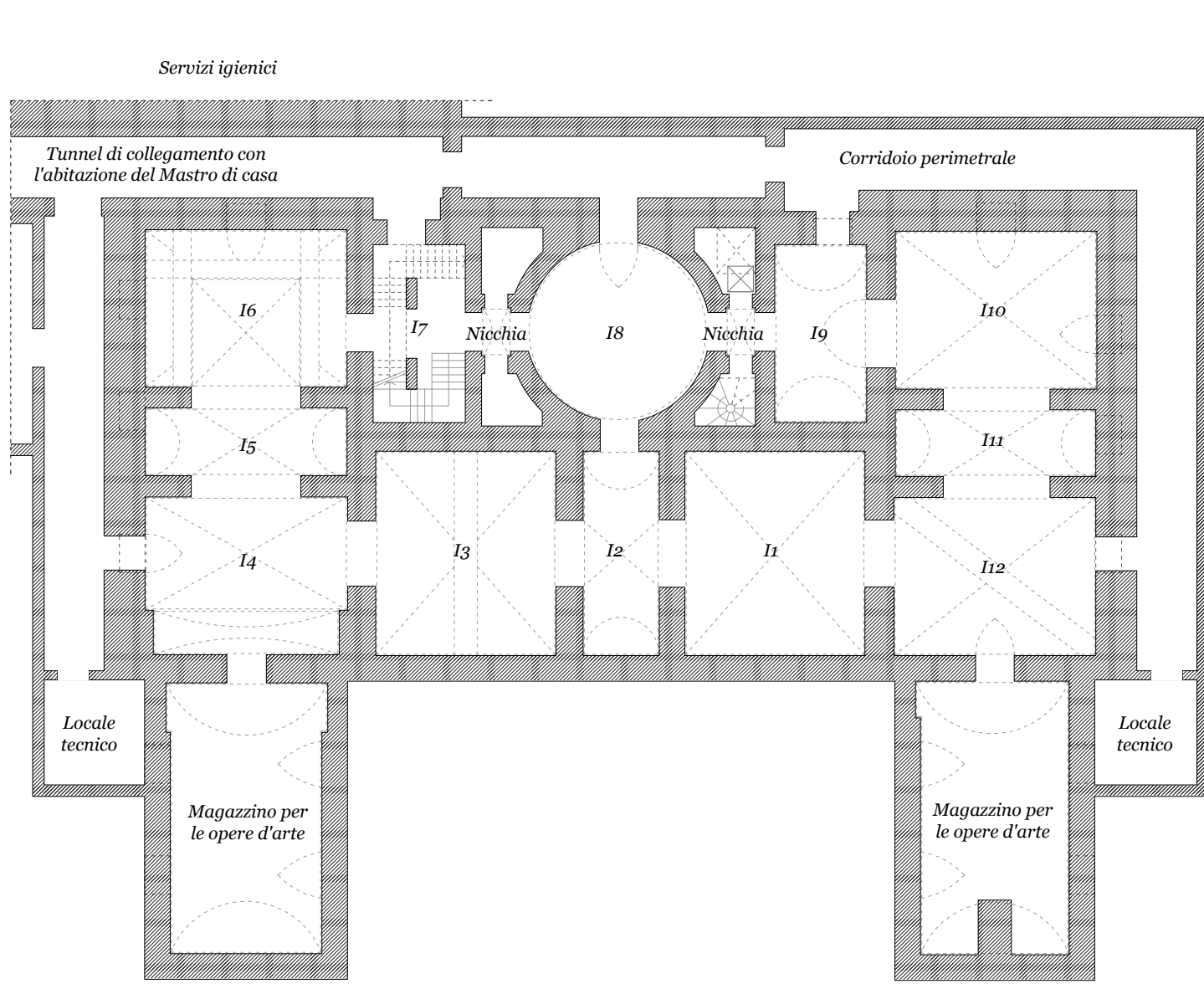


alcune semplici che seguono il modello apparentemente originario con monaco e saette (ambiente centrale meridionale e laterale ovest, antica lavanderia), altre quello più elaborato della capriata spaziale (ambiente meridionale laterale est); tutti e due i modelli, in ogni modo, sono stati oggetto di modifiche piuttosto rozze negli ultimi anni, che vanno dal rinforzo del puntone nella parte inferiore fino agli interventi più drastici in alcuni casi di sostituzione della catena con un sistema complesso di travi mozzate.

Dal punto di vista del comportamento meccanico della struttura, i martinetti piatti singoli eseguiti sui due lati simmetrici della struttura al piano seminterrato (sala I6 e I10) hanno dato valori dello stato di sforzo locale molto simili (attorno a  $0,28 \text{ N/mm}^2$ ), indicando una distribuzione dei carichi uniforme tra i vari corpi di fabbrica. La prova con martinetto doppio invece ha restituito un modulo elastico pari a  $2200 \text{ N/mm}^2$  nell'intervallo elastico  $0,10-1,10 \text{ N/mm}^2$ , e un carico agente compreso all'interno dell'intervallo elastico lineare del grafico sforzi-deformazioni.

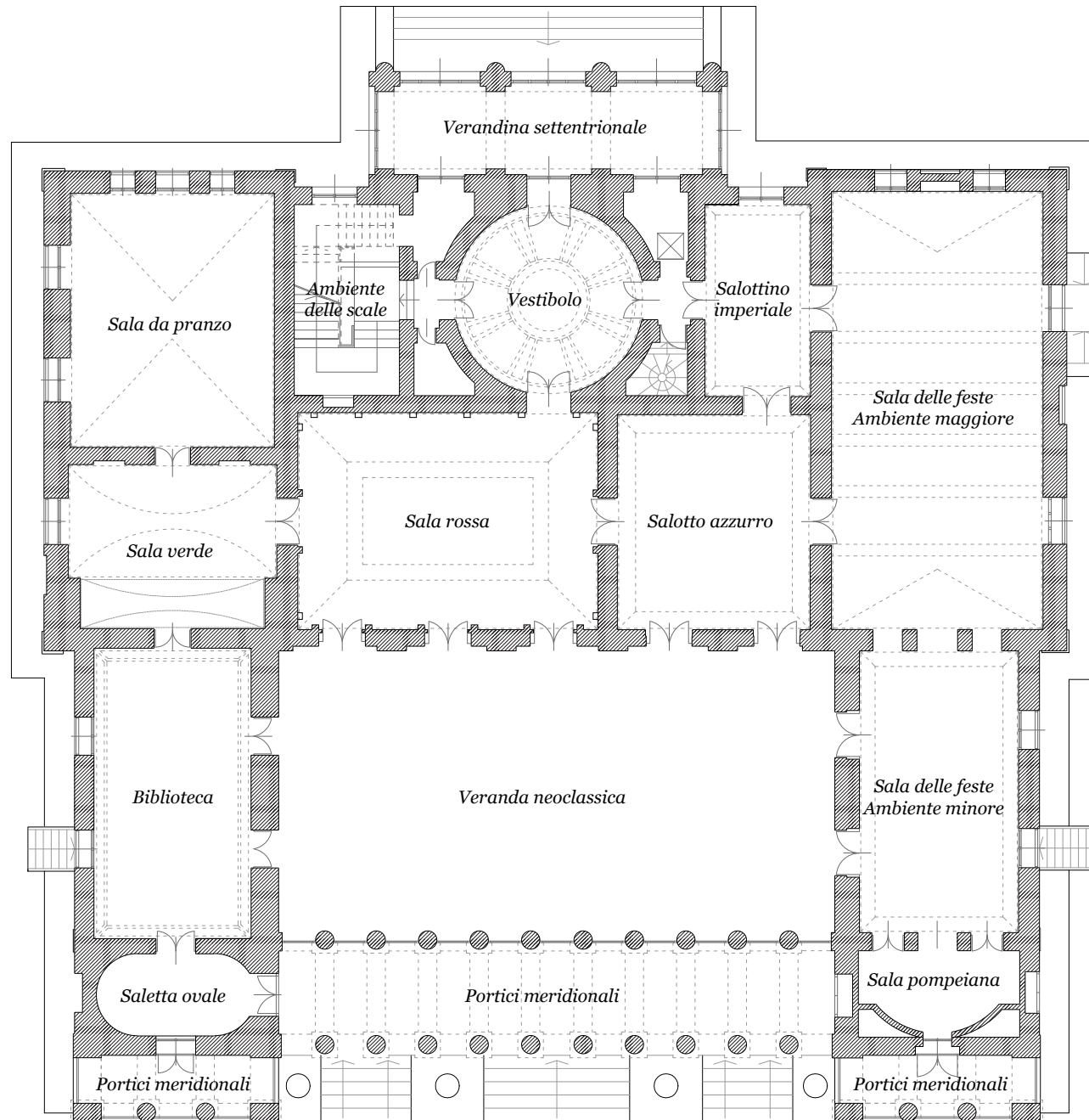
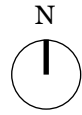
Importanti indicazioni sono state date anche dallo studio del quadro fessurativo. Il piano seminterrato al momento non manifesta fenomeni degni di nota, dato che le uniche lesioni visibili sono localizzate nelle nicchie (nessuna corrispondenza o possibile relazione con lesioni ai piani superiori) e in corrispondenza del passaggio delle canaline degli impianti. Tuttavia il quadro attuale non è completamente attendibile dato che gli ambienti sono stati recentemente oggetto di massicci interventi di restauro che potrebbero aver coperto quadri fessurativi importanti: a sostegno di questa tesi è presente un rilievo del 2003 che mostra evidenti lesioni provocate dal sisma del 2002, oltre ad un'immagine termografica che mostra una lesione piuttosto importante nel passaggio tra la sala I11 e I12.

Il piano rialzato invece presenta una situazione completamente differente, con lesioni diffuse in gran parte degli ambienti maggiormente visibili a livello degli orizzontamenti: difatti la quasi totalità delle pareti è ricoperta da paramenti di varia natura, che impediscono una corretta visualizzazione del quadro fessurativo; occorre però anche ricordare la presenza diffusa delle finte volte, che a loro volta non garantiscono sempre una corretta interpretazione dei fenomeni. Riassumendo, sono presenti diverse fessurazioni nel lato orientale dell'edificio, quello della Sala delle feste, a livello di cornici, volte e aperture di passaggio, che non sono state tuttavia valutate come sintomo di particolari meccanismi in



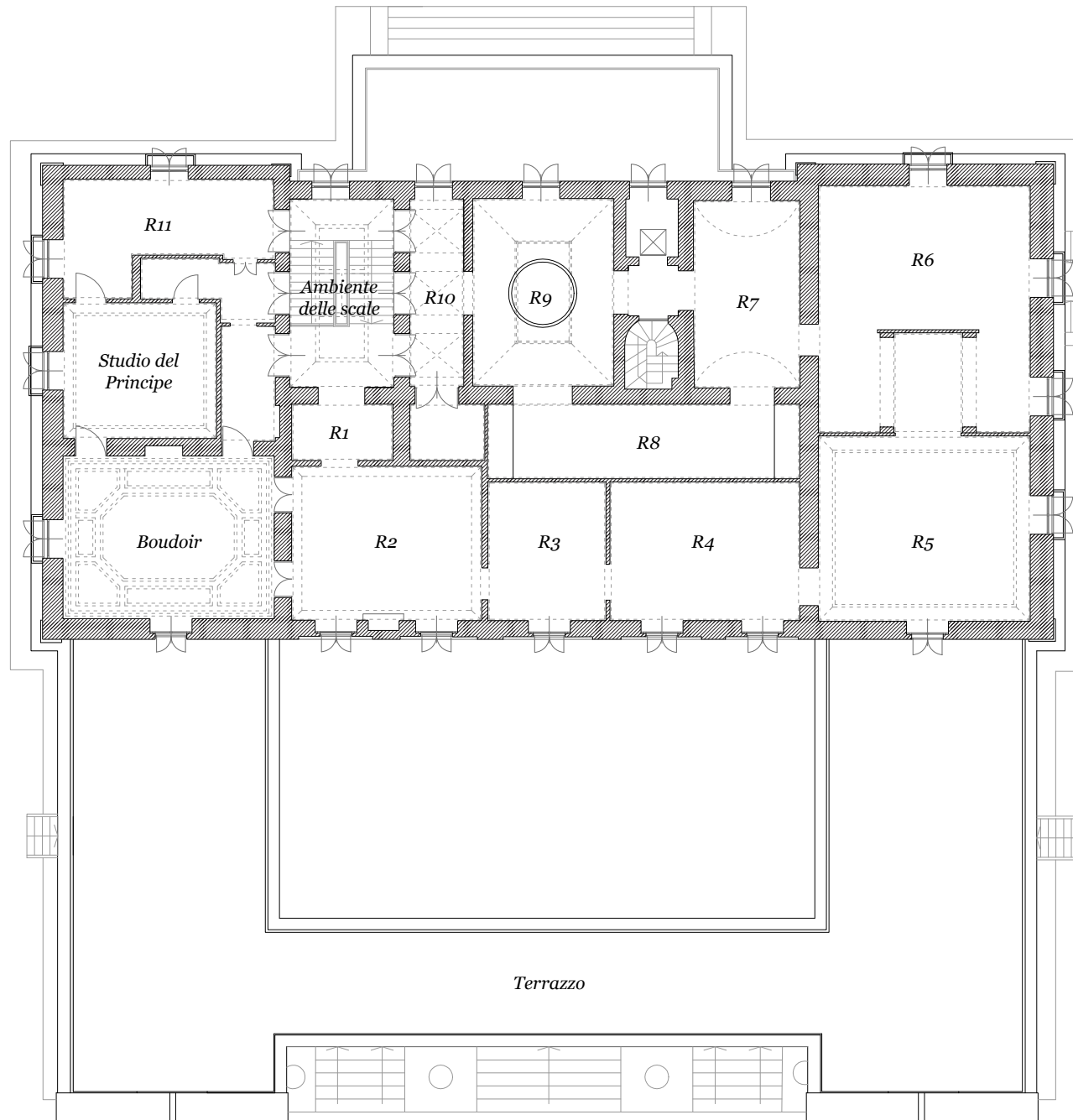
5.3. Planimetria del piano seminterrato con proiezione delle volte e degli archi e con denominazione ambienti

0 1 5 m

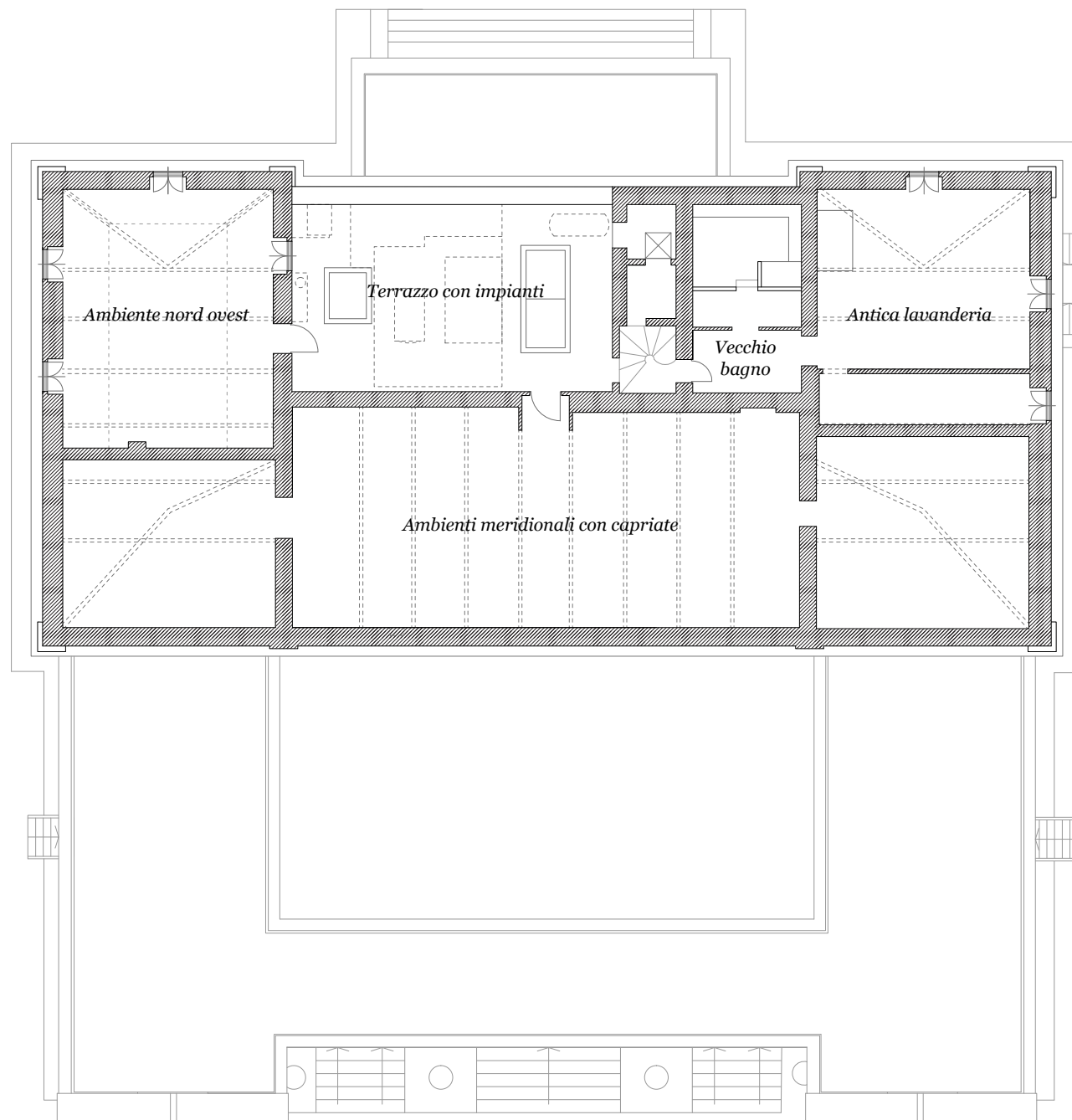
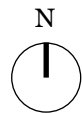


0 1 5 m

5.4. Planimetria del piano rialzato con proiezione delle volte e denominazione ambienti



5-5. *Planimetria del piano primo con proiezione delle volte e denominazione ambienti*



0 1 5 m

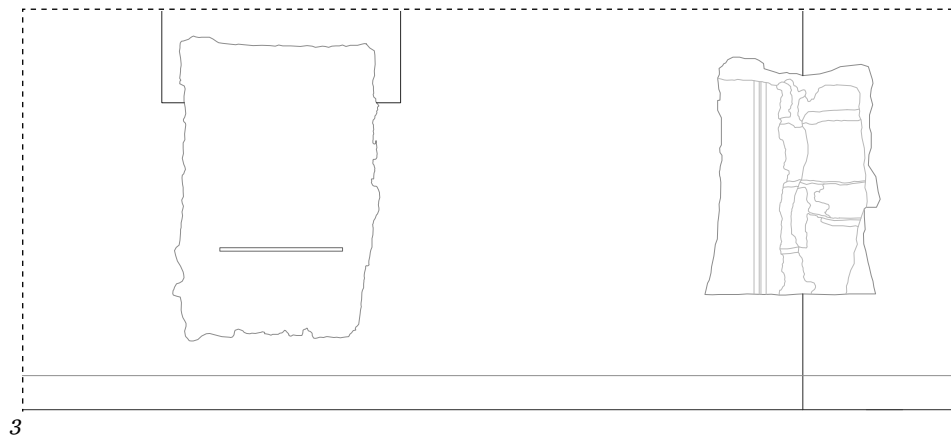
5.6. *Planimetria del piano del sottotetto con proiezione delle capriate e denominazione ambienti*



1



2



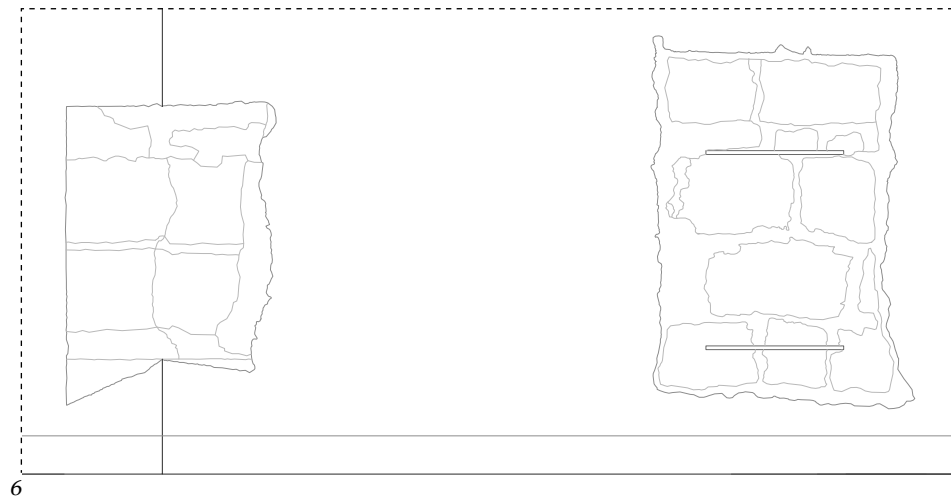
3



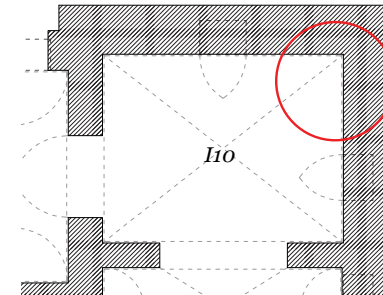
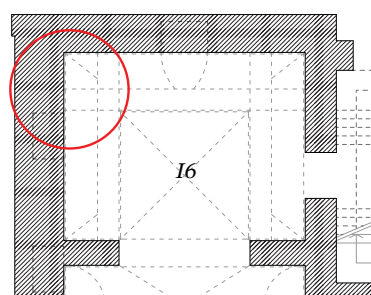
4



5

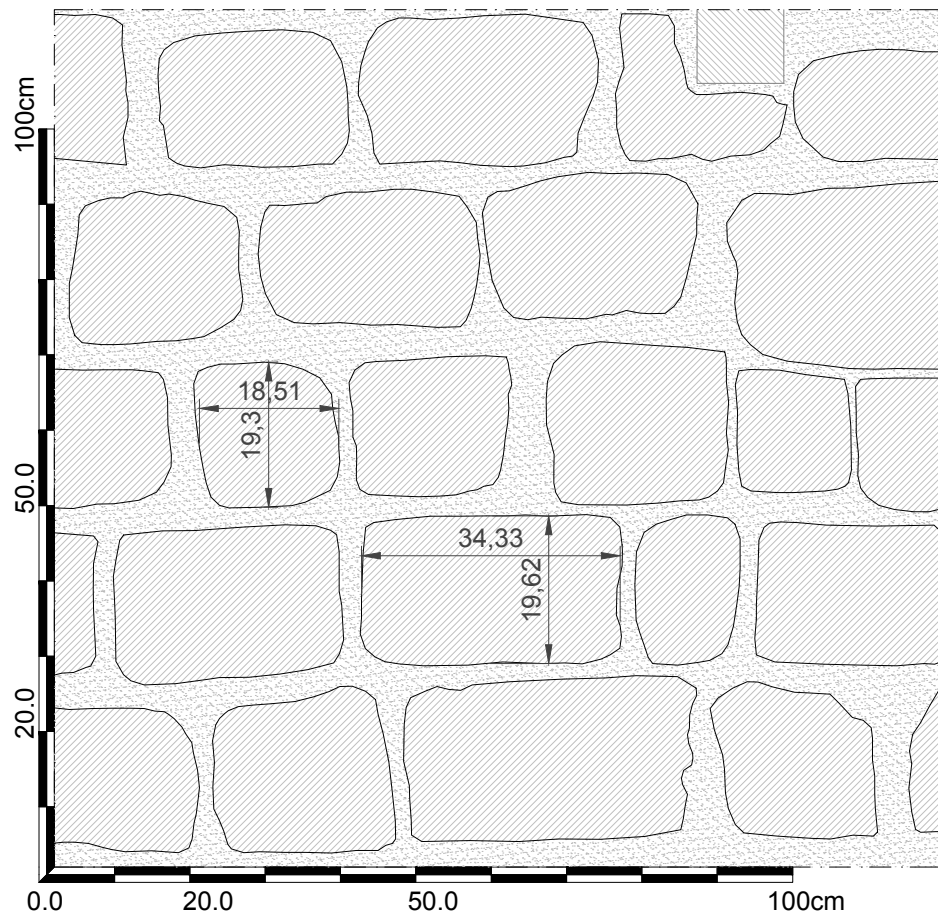


6

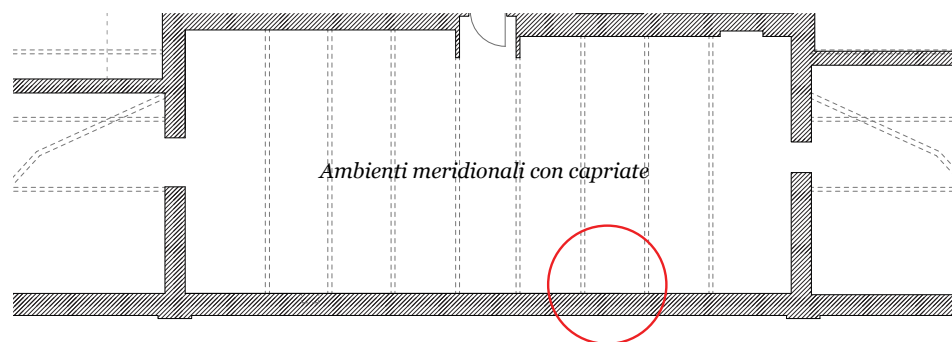


7

5.7. Analisi della tessitura muraria e dell'ammorsamento effettuate nelle sale I6 e I10 al piano seminterrato: immagini fotografiche e rappresentazione grafiche relative a I6 (1,2,3) e I10 (4,5,6), localizzazione indagini (7)

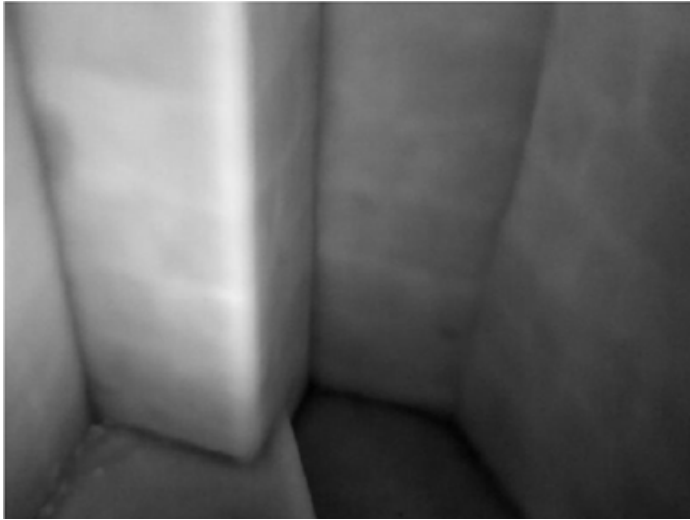


2 1



3

5.8. Analisi della tessitura muraria effettuata nell'ambiente meridionale centrale con capriate al piano del sottotetto: immagine fotografica (1), rappresentazione grafica (2) e localizzazione (3)



1



2



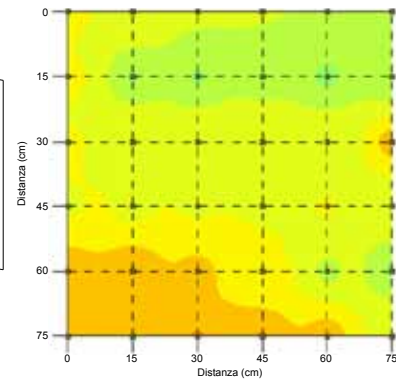
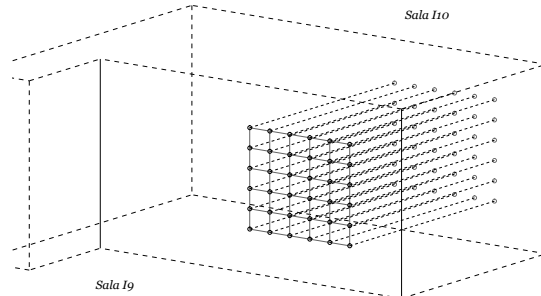
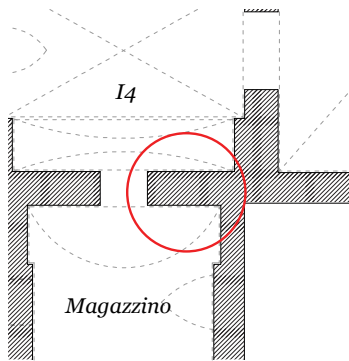
3



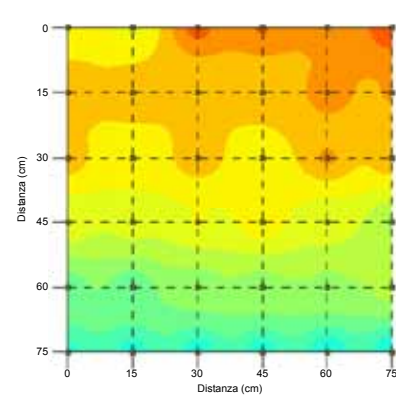
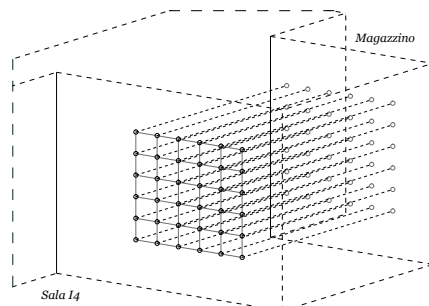
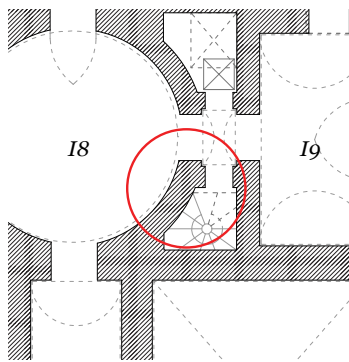
4

5.9. Indagini termografiche in vari punti dell'edificio: tessitura muraria e ammorsamenti della parete nella nicchia delle scale al seminterrato (1,2), il recente sistema misto in cemento armato e muratura nei corridoi del seminterrato (3), tessitura muraria e ammorsamenti nella sala R7 nel piano primo (4)

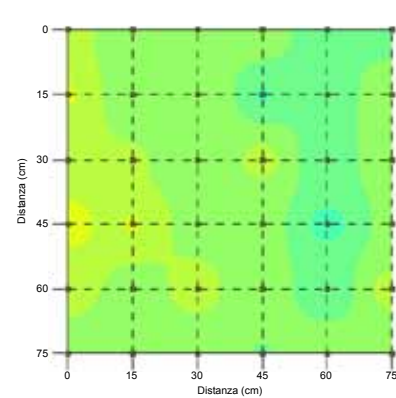
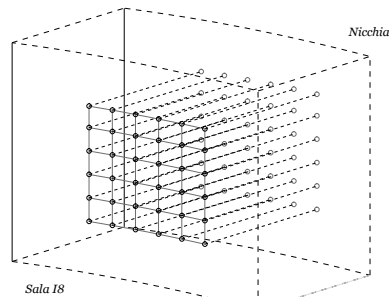
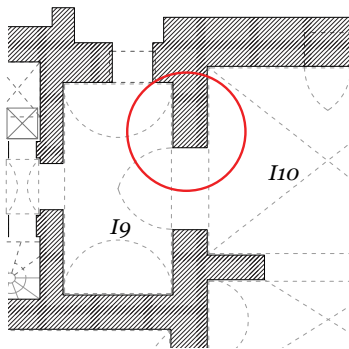




<b>Velocità minima (m/s)</b>	
punto 35	650
<b>Velocità massima (m/s)</b>	
punto 6	1609
<b>Velocità media (m/s)</b>	
1179	
<b>Deviazione standard (m/s)</b>	
288	

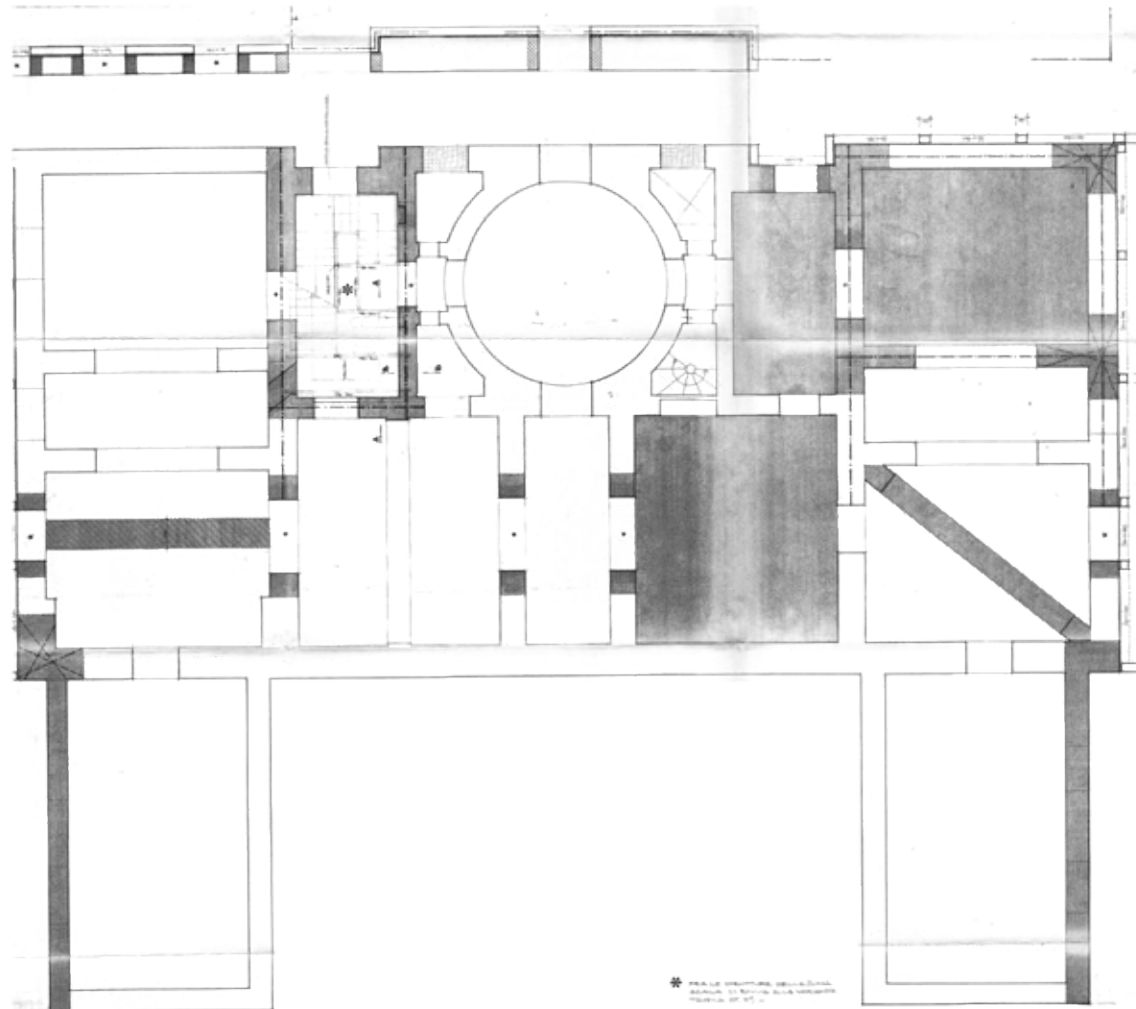


<b>Velocità minima (m/s)</b>	
punto 23	779
<b>Velocità massima (m/s)</b>	
punto 19	1250
<b>Velocità media (m/s)</b>	
1006	
<b>Deviazione standard (m/s)</b>	
106	



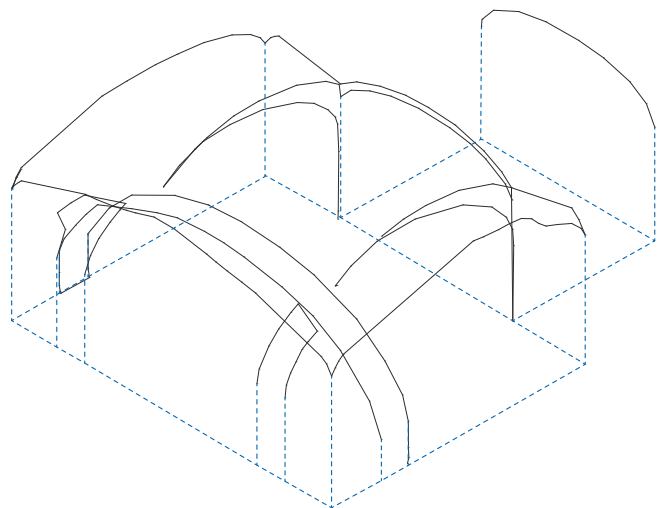
<b>Velocità minima (m/s)</b>	
punto 11	997
<b>Velocità massima (m/s)</b>	
punto 34	1433
<b>Velocità media (m/s)</b>	
1221	
<b>Deviazione standard (m/s)</b>	
131	

5.10. Quadro sintetico delle indagini soniche realizzate ai setti portanti del piano seminterrato, con relative tabelle coi valori principali

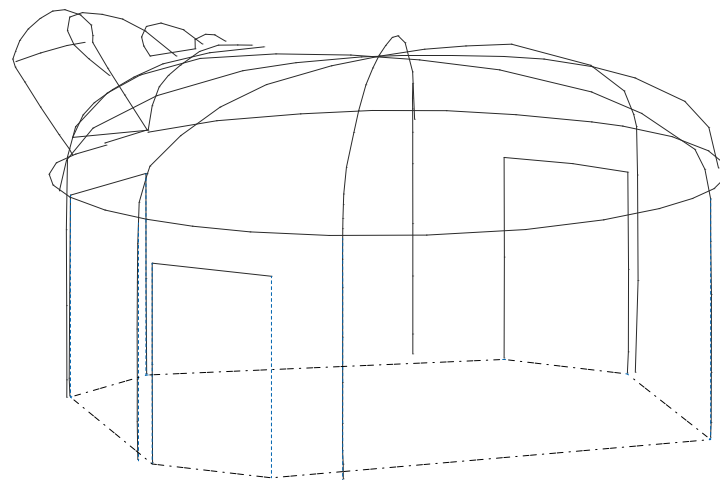


5.11. *Planimetria del piano seminterrato del 1991 con segnalate tutte le cementazioni e le armature delle aperture, delle murature e delle volte realizzate all'inizio degli anni novanta*

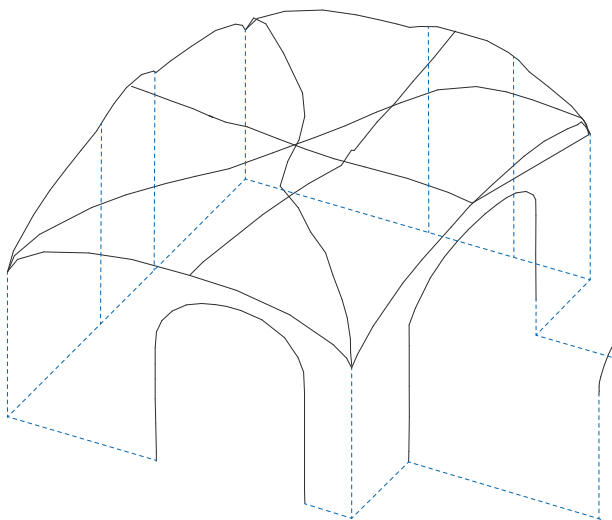




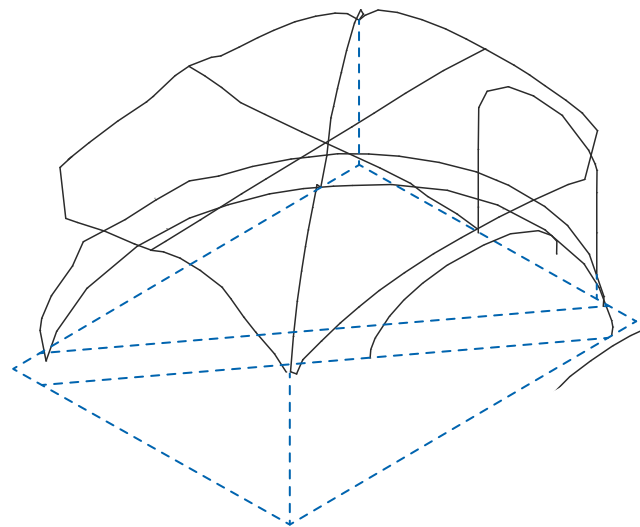
1



2

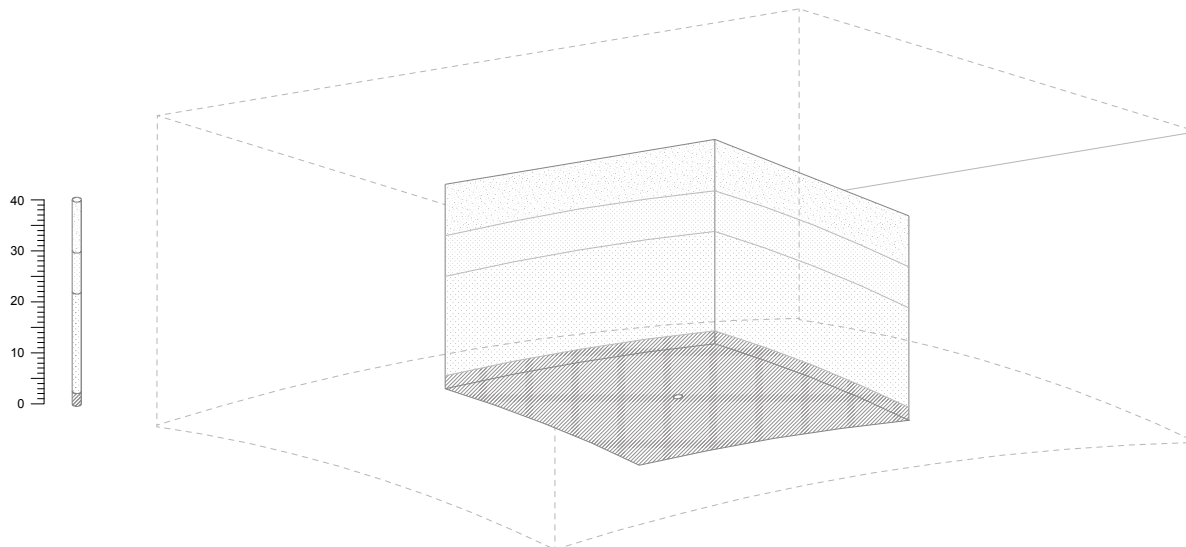
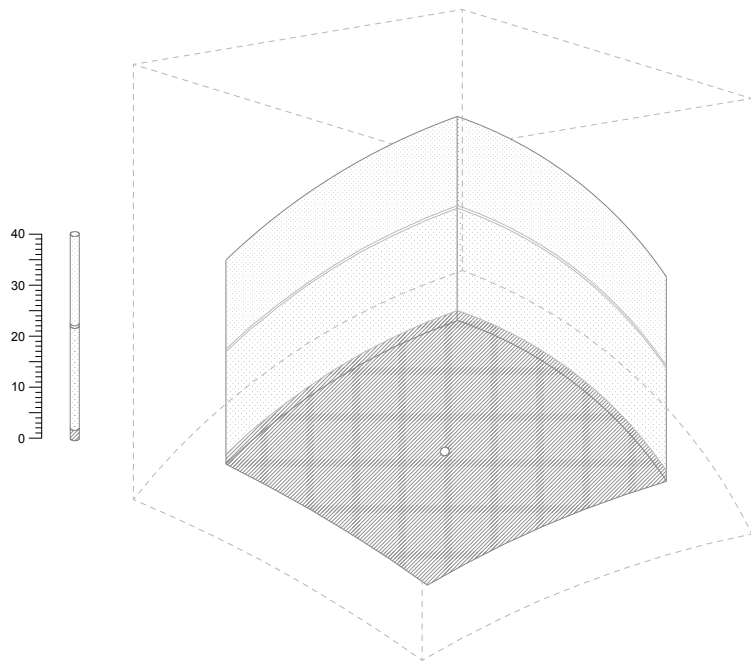






3



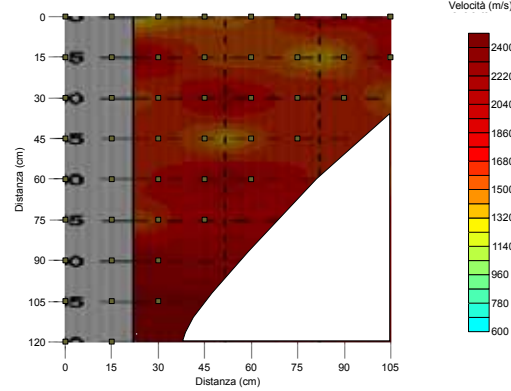
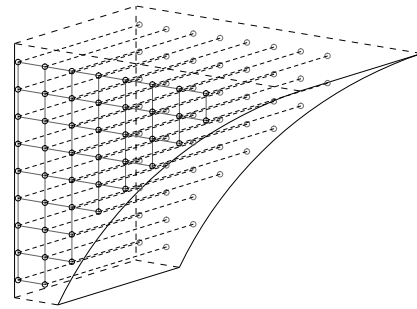
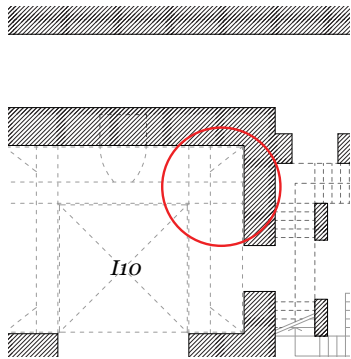
4

5.13. Ricostruzioni da rilievo con stazione totale delle volte della sala I6 (1), I8 (2), I10 (3) e I12 (4)

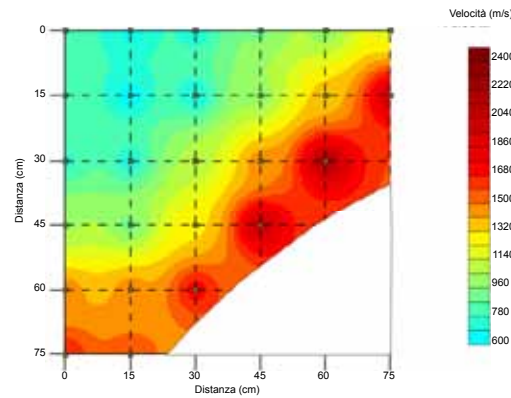
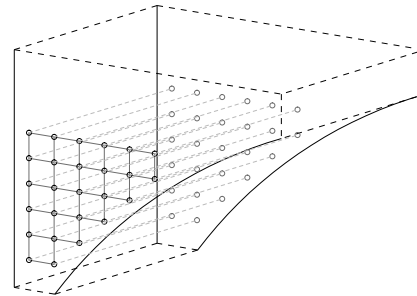
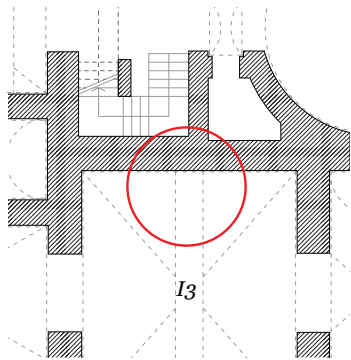


- |  |             |  |   |
|--|-------------|--|---|
|   | Intonaco    |   | Materiale lievemente più scuro del tufo superficiale, probabilmente sempre tufo |
|  | Tufo chiaro |  | Sottofondo del pavimento in sabbia e leganti                                    |

5.14. Risultati delle endoscopie realizzate ai reni e in chiave alla volta della sala 110 al piano seminterrato

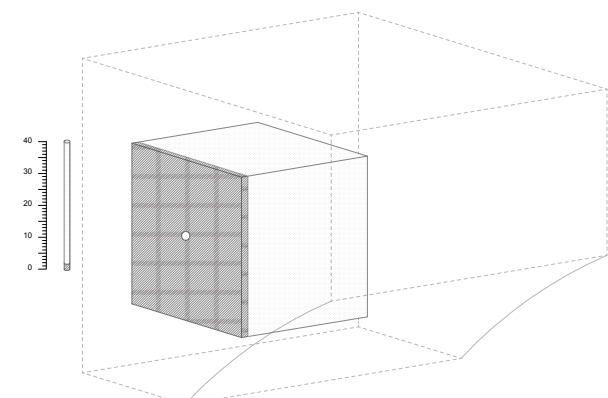
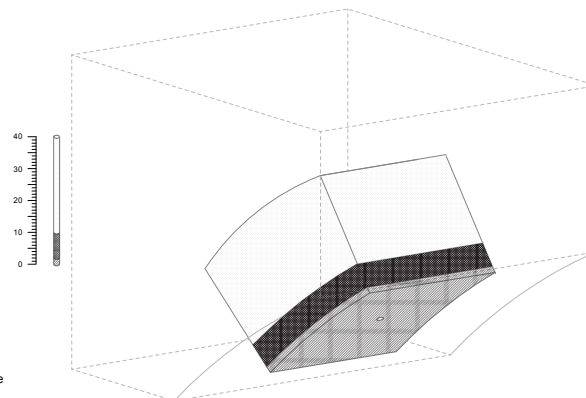
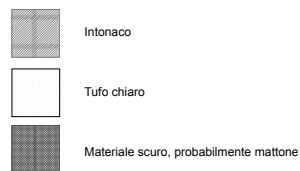


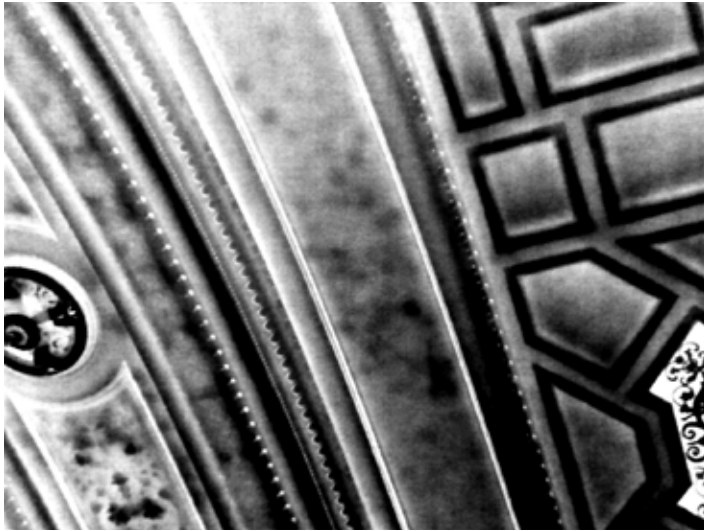
<b>Velocità minima (m/s)</b>	
punto 1	1211
<b>Velocità massima (m/s)</b>	
punto 46	2333
<b>Velocità media (m/s)</b>	
1730	
<b>Deviazione standard (m/s)</b>	
312	



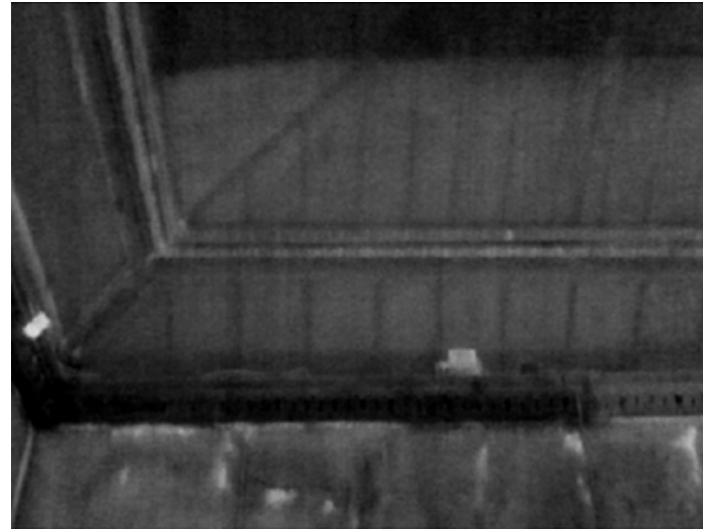
<b>Velocità minima (m/s)</b>	
punto 8	604
<b>Velocità massima (m/s)</b>	
punto 17	2200
<b>Velocità media (m/s)</b>	
1195	
<b>Deviazione standard (m/s)</b>	
480	

5.15. In alto quadro sintetico delle indagini soniche realizzate su gli archi strutturali del piano seminterrato, con relative tabelle coi valori principali; indagine tramite endoscopio dell'arco strutturale diagonale della sala I12

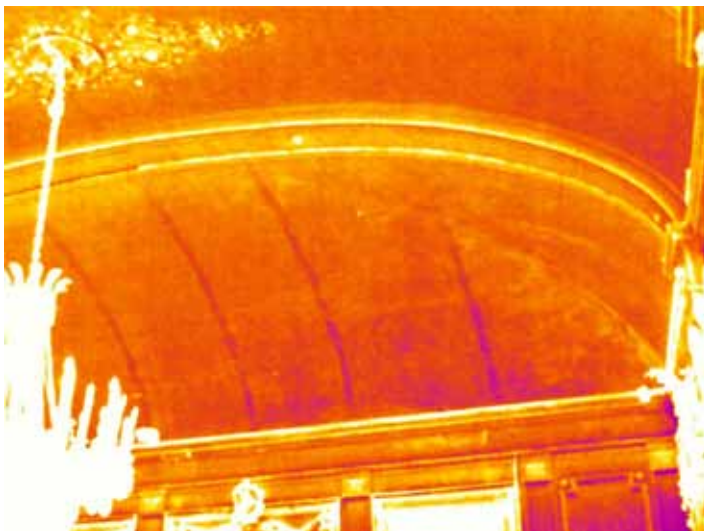




1



2



3



4

5.16. Indagini termografiche in vari punti del piano rialzato: la volta a botte in muratura della Sala verde (1), la struttura lignea della finta volta nella Biblioteca (2) e nell'ambiente maggiore (3) e nell'ambiente minore (4) della Sala delle feste

atto: la situazione è comunque da monitorare soprattutto se dovessero ricomparire quelle già rilevate nel 2003 negli ambienti corrispondenti al piano seminterrato. Un quadro fessurativo piuttosto complesso è presente in corrispondenza dei portici meridionali, soprattutto a livello delle travi di collegamento tra le colonne: tuttavia, come nel caso delle fessurazioni nella Verandina settentrionale, queste lesioni sono state interpretate come causate dalla discontinuità di materiale e in ogni caso di importanza minore visto il ruolo nel complesso strutturale complessivo. I terremoti del 1980 e del 2002 hanno particolarmente coinvolto la Sala rossa, con fenomeni che hanno interessato soprattutto alcune aree della volta a schifo: tuttavia, dal 2003 il quadro non pare essersi aggravato, e non sembrano esserci corrispondenze significative negli altri piani. Tutt'altra rilevanza hanno invece le fessurazioni nell'ala occidentale, intesa come l'insieme di Sala da pranzo, Sala verde e Biblioteca: qui il quadro fessurativo era piuttosto preoccupante, con lesioni all'interno degli ambienti e nelle aperture di passaggio. La Sala verde, che non a caso è l'unica sala con la struttura in muratura della copertura certa e visibile attraverso prova termografica, è la più interessante viste le lesioni verticali nelle lunette delle volte a botte e lesioni in direzione nord sud nelle stesse volte; è presente inoltre una fessurazione che dalla piattabanda del passaggio verso la Sala rossa prosegue verso la volta. Se nel piano seminterrato per ora non sono visibili fenomeni correlati, diverso è il discorso per il piano primo, dove nel lato esterno del setto verso il terrazzo del Boudoir, corrispondente alla divisione tra Sala verde e Biblioteca, sono presenti diverse fessurazioni verticali

Per il resto el piano primo non sono presenti quadri fessurativi degni di nota, ad esclusione di due sistemi di lesioni nelle sale R7 e R9, con quelle nella prima che potrebbero acquisire un certo significato se dovessero riapparire delle fessurazioni nella sala corrispondente I9 al piano seminterrato. Inoltre è opportuno segnalare come nel 1999 il piano si presentasse relativamente fessurato, ma che evidentemente le riparazioni e gli accorgimenti occorsi, insieme ai rinforzi strutturali, hanno impedito un rimanifestarsi del fenomeno.

Nel piano del sottotetto non sono presenti lesioni di particolare entità.



Come detto, il livello di valutazione LV1 utilizza modelli di calcolo semplificati per definire gli indici di sicurezza della costruzione: nel nostro caso il Ministero dei Beni Culturali ha disposto l'utilizzo e fornito un programma denominato SIVARS che guida, attraverso una serie di schede preimpostate, la valutazione di sicurezza sismica del bene tutelato oggetto dello studio. L'autore della tesi ha collaborato in maniera attiva alle prime fasi di compilazione dato che, come vedremo, richiedono una conoscenza dell'organismo edilizio piuttosto approfondita.

L'analisi attraverso l'uso di questo programma richiede infatti fin da subito l'identificazione di alcune informazioni e caratteristiche basilari in modo da interpretare le tecniche costruttive impiegate nell'edificio. In particolare, occorre dare la definizione delle caratteristiche principali degli elementi verticali, complete di qualità degli ammorsamenti e della tessitura muraria, oltre alle informazioni base come lo spessore ai diversi piani. Nel nostro caso il quadro da questo di vista era abbastanza completo, visto l'accurato rilievo geometrico effettuato e le diverse indagini in situ, come per esempio le rimozioni di intonaco o le indagini termografiche, che hanno messo in luce chiaramente le caratteristiche della struttura in conci di tufo. Quindi bisogna definire la qualità e la composizione degli orizzontamenti ai diversi livelli dell'edificio: abbiamo visto come questo non sia stato sempre semplice, soprattutto negli ambienti superiori. Se infatti l'insieme di endoscopie e verifiche con stazione totale e transpointer ha restituito un quadro abbastanza fedele del sistema in volte e archi al piano seminterrato, la situazione al piano rialzato è risultata più complessa, vista la massiccia presenza di finte volte: si è dovuto fare quindi ricorso a termografie e ad una correlazione con le informazioni ricavate dallo studio dell'evoluzione storica dell'edificio per arrivare a delle conclusioni, ritenute comunque alla fine abbastanza attendibili. Le stesse indagini storiche sono fondamentali per ottenere informazioni riguardo al piano primo e del sottotetto, fortemente rimaneggiati negli ultimi vent'anni.

Per quanto riguarda la definizione del fattore di confidenza, sappiamo che secondo le Linee guida del 2010 questo dev'essere calcolato sommando quattro fattori di confidenza minori, dipendenti dalla qualità dell'indagine diagnostica (immagine 5.11). Nel nostro caso è stato definito:

- **Rilievo geometrico  $FC_1=0$** : il rilievo geometrico è stato infatti esaustivo e completo di quadri fessurativi e analisi delle deformazioni;
- **Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica  $FC_2=0,6$** : sebbene abbastanza estesa e articolata, l'indagine strutturale e storica ha lasciato alcune fasi d'ombra, che non hanno permesso di avere un quadro completo dell'edificio;
- **Proprietà meccaniche dei materiali  $FC_3=0,6$** : le caratteristiche delle murature sono state studiate in parte tramite le prove soniche di trasparenza e con le prove con i martinetti piatti, non ottenendo informazioni complete per definire tutti i parametri delle strutture, ma definendo in modo qualitativo la morfologia della sezione muraria e in maniera quantitativa i carichi agenti in punti specifici e le caratteristiche tenso-deformative delle aree di prova;
- **Terreno e fondazioni  $FC_4=0$** : le indagini su terreno e fondazioni sono state ritenute soddisfacenti ed esaustive.

Il fattore di confidenza **FC** di riferimento è stato quindi:  $FC_1+FC_2+FC_3+FC_4=0+0,6+0,6+0= \mathbf{1,2}$ .

Per ricostruire il modello, SIVARS richiede quindi la definizione di sei parametri, calcolati partendo dai seguenti studi:

- **Altezza di interpiano**: da rilievo geometrico;
- **Fattore di struttura**: da considerazioni sulla struttura e la conformazione della pianta;
- **Tipologia di collasso**: dalla normativa di riferimento;
- **Fattore di amplificazione del terreno**: dalla normativa di riferimento o sulla base delle prove geotecniche;
- **Accelerazione di riferimento**: dalla normativa di riferimento o sulla base delle prove geotecniche;
- **Proprietà meccaniche dei materiali**: dalla normativa o sulla base dei risultati delle prove diagnostiche.

Per quanto riguarda l'ultimo punto, soprattutto per questo livello di valutazione, non è assolutamente necessario effettuare indagini approfondite, soprattutto considerando la forte invasività che queste richiedono. Nella stesse Linee guida del 2010 si prevede di riferirsi alle proprietà meccaniche presenti nella tabella C.8A.2.1 della circolare n°617 del 2009 (immagine 5.12), in cui a ogni tipologia muraria corrispondono dei valori di riferimento.

Sempre secondo la normativa, a questi parametri è necessario applicare un coefficiente correttivo determinato da particolari condizioni vantaggiose della muratura, contenuto nella tabella C.8A.2.2 della stessa circolare (immagine 5.13). Nel nostro caso, le indagini diagnostiche hanno messo in luce la buona qualità e il buono stato della malta, fattore che ha permesso la moltiplicazione di tutti i parametri meccanici per un valore pari a 1,5.

Occorre segnalare che nella produzione del modello sono da tenere in considerazione anche tutti quegli aspetti che migliorano le prestazioni della struttura: nel nostro caso, per esempio, bisogna considerare la presenza delle catene di collegamento tra i setti del piano rialzato e del sottotetto, dato il conseguente miglioramento delle prestazioni meccaniche di questi ultimi. Dall'altra parte, bisogna però tenere conto anche di caratteristiche che nel caso di una valutazione di sicurezza potrebbero ridurre i valori meccanici ottenuti: infatti viene inserito un ulteriore fattore di confidenza determinato durante una fase di "valutazione culturale", in cui viene effettuata una stima dell'uso del bene e la rilevanza dello stesso. Nel nostro caso, per esempio, si stima una fruizione da parte del pubblico di tipo frequente e una rilevanza di tipo medio.

Delle fasi di calcolo conclusive presenti in SIVARS non ci si occuperà nel dettaglio in questa tesi anche perchè non ancora completate. Esse consistono in ogni caso in un'accurata analisi dei carichi dei diversi elementi strutturali considerati. Una volta determinate le masse sismiche, il programma conduce il calcolo allo stato limite ultimo delle strutture per ciascuno dei piani dell'edificio. Per ciascuno dei livelli che compongono la struttura, viene ricavata un'accelerazione di collasso alla quale corrisponde il valore che, in seguito alla sollecitazione derivante da un sisma, origina l'innescò del danno che conduce al dissesto. Facendo il confronto tra questi risultati, si identifica il piano più debole per il quale è possibile successivamente riflettere sull'opportunità di eseguire dei rinforzi.

<b>Rilievo geometrico</b>	<b>Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica</b>	<b>Proprietà meccaniche dei materiali</b>	<b>Terreno e fondazioni</b>
Rilievo geometrico completo $FC_1 = 0.05$	Restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $FC_2 = 0.12$	Parametri meccanici desunti da dati già disponibili $FC_3 = 0.12$	Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni $FC_4 = 0.06$
Rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $FC_1 = 0$	Restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $FC_2 = 0.06$	Limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali $FC_3 = 0.06$	Disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni $FC_4 = 0.03$
	Restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche) $FC_2 = 0$	Estese indagini sui parametri meccanici dei materiali $FC_3 = 0$	Estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni $FC_4 = 0$

5.17. La tabella 4.1 estratta dalla Circolare n° 26 del 2010: definizione dei livelli di approfondimento delle indagini sui diversi aspetti della conoscenza e relativi fattori parziali di confidenza, con evidenziati quelli ottenuti nello studio di Villa Pignatelli

Tipologia di muratura	$f_m$	$\tau_0$	E	G	w
	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/cm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(KN/m <sup>3</sup> )
	Min Max	Min Max	Min Max	Min Max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrate	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura <45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

5.18. La tabella C8A.2.1 estratta dalla Circolare n° 617 del 2009: valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, con evidenziata la tipologia considerata nelle analisi meccaniche di Villa Pignatelli

<b>Tipologia di muratura</b>	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc...)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrate	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

5.19. *La tabella C8A.2.2 estratta dalla Circolare n° 617 del 2009: coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati in Tabella C8A.2.1) con evidenziati quelli presi in considerazione nelle analisi meccaniche di Villa Pignatelli*

**I**l livello di valutazione LV2 mira ad analizzare parti strutturalmente autonome dell'edificio, definite macroelementi, attraverso l'utilizzo di modelli locali e di metodi di analisi cinematica lineari e non. Questo tipo di verifica è consigliabile per quelle porzioni apparse particolarmente problematiche durante la fase investigativa: appare quindi necessario riferirsi a tutti gli studi riguardanti la struttura e, in particolar modo, all'analisi del quadro fessurativo.

Come abbiamo visto, per quanto riguarda gli orizzontamenti, nel nostro caso possono essere identificati tre sistemi principali, quello costituito da volte portanti in muratura, quello costituito da solai piani con travi in acciaio o legno, molto spesso celati da finte volte su telaio ligneo, e quello costituito dalle capriate lignee di copertura. Molti di questi elementi, insieme ai setti verticali strutturali, sono oggetto di quadri fessurativi più o meno complessi: il piano che al momento manifesta la maggior quantità di lesioni è sicuramente quello rialzato. Molte delle fessurazioni registrate, come per esempio quelle relative ai Portici meridionali o alla Verandina settentrionale, sono da catalogare come sintomo di discontinuità dei materiali, mentre altre potrebbero effettivamente rivelarsi come lesioni strutturali e perciò indicare la presenza di qualche dissesto in atto. Da questo punto di vista, l'ala occidentale dell'edificio è quella che attira maggiormente l'attenzione, viste soprattutto le fessurazioni rilevate nella Sala verde.

Come nel livello di valutazione 1, prima di effettuare i calcoli sulla porzione scelta è necessario riprendere tutte le informazioni base sull'edificio elaborate nelle fasi di studio precedenti. Dato che l'LV2 può essere inteso come un approfondimento dell'LV1, i parametri di calcolo sono più o meno i medesimi già esposti nel paragrafo precedente. Quindi è necessario considerare un fattore di confidenza FC pari

a 1,12 e gli stessi parametri meccanici ottenuti dalla tabella della circolare del 2009, migliorati con il coefficiente correttivo pari a 1,5 determinato dalla buona qualità della malta delle murature. Le uniche differenze riguardano l'aggiunta di alcuni parametri fondamentali da tenere in considerazione, definiti insieme ai loro metodi di calcolo dalle normative ad oggi vigenti, e consistenti in:

- Azione sismica, dipendente dalla Vita nominale e dal Coefficiente d'uso dell'edificio;
- Fattore di struttura;
- Accelerazione di attivazione del meccanismo locale;
- Accelerazione di riferimento per lo stato limite di danno.

Essendo l'ala ovest quella maggiormente "allarmante" dal punto di vista del quadro fessurativo, le ipotesi di meccanismo locale saranno da concentrare in questo punto: in particolare, le lesioni sulla chiave della volta a botte in muratura della Sala verde sono le più interessanti. Queste potrebbero infatti essere causate dalla volta fortemente ribassata, che potrebbe in caso di presenza di spinte particolarmente forti scaricare i carichi sulle murature perimetrali di appoggio, causando un ribaltamento della struttura. Bisogna anche considerare che il buon ammorsamento evidenziato durante la fase diagnostica qui causerebbe un trascinamento, da parte della parete coinvolta dal fenomeno, delle pareti di spina ad essa collegate. Si è quindi deciso di ipotizzare un meccanismo di collasso secondo tre ipotesi di fessurazione critica (lesione diagonale a 15, 20, o 25 gradi), calcolando per ognuna di esse la resistenza della struttura al ribaltamento fuori dal piano.

Per il corretto sviluppo del modello di riferimento è necessaria una definizione relativamente accurata dei carichi gravanti sulla muratura, dipendente dalle informazioni raccolte in precedenza. Per questo motivo è stata necessaria una partecipazione degli attori della parte diagnostica, tra cui l'autore, in modo da definire la composizione e la stratigrafia della struttura in questo punto. Per la volta si è definita la presenza di una doppia fila di conci in tufo su cui pesa lo strato di materiali di allettamento per la pavimentazione al piano superiore; lo spessore del pacchetto di copertura è stato determinato attraverso l'utilizzo di un transpointer, mentre per i carichi accidentali agenti si sono considerati i rilievi effettuati al piano seminterrato. La spinta della volta invece è stata calcolata preliminarmente in maniera approssimativa considerando l'inclinazione della sezione di imposta, pari in questo caso



a circa  $75^\circ$ . Quella del solaio relativo al piano del sottotetto non è determinante, dato che esso, data l'orditura delle travi che lo sostengono parallela ai muri perimetrali, si trova a scaricare il proprio peso sui muri di spina.

Altro elemento necessario alla fase di calcolo è la definizione delle proporzioni geometriche dei vari elementi che compongono la struttura, senza la quale non è possibile determinare la massa muraria dei setti, le spinte prodotte dalle volte in maniera definitiva, i carichi agenti secondo il contributo di solai e copertura.

**I**l livello di valutazione LV3 consiste in un'analisi complessiva dell'edificio, attraverso la divisione della struttura in macroelementi e il loro studio attraverso modelli locali oppure attraverso l'utilizzo di modelli globali che considerano l'edificio nella sua totalità. Il programma da noi adottato, TREMURI, abbraccia la seconda filosofia ed è stato sviluppato appositamente per lo studio degli edifici in muratura. I setti murari dell'edificio vengono modellati in telai equivalenti, e scomposti in elemento maschio murario e elemento trave sottofinestra collegati da zone nodali rigide. Gli orizzontamenti assumono rigidità diverse, secondo la loro composizione e geometria, e determinano le modalità in cui essi assumono i compiti di collegamento, distribuzione e trasmissione dei carichi. Un aspetto importante di questo programma è che le volte, in questo modello, vengono trasformate in solai piani equivalenti: soprattutto in un edificio come il nostro, non è improbabile che questa caratteristica possa rappresentare un limite in fase di calcolo.

Tutto questo processo di conversione della struttura nel modello a telai è attuato in maniera automatica da parte del programma, che si basa sulle definizioni date nella fase di indagine della geometria dei vari elementi strutturali e delle aperture. Quindi appare chiaro come l'accuratezza del risultato sia direttamente proporzionale a quella del rilievo e delle indagini che hanno messo in luce il rispetto della regola d'arte per le strutture (ammorsamenti e collegamenti tra strutture contigue).

Come visto in precedenza, in questa tesi non verranno trattate le fasi dell'analisi successive, dato che richiedono conoscenze più specifiche e non sono state completate. Occorre comunque dire che verrà eseguita un'analisi non lineare con forze orizzontali crescenti fino al punto di collasso, secondo il modello push-over. Le forze orizzontali infatti rappresentano le sollecitazioni prodotte da un evento

sismico, e una volta applicate servono a definire il comportamento globale della struttura; questo verrà rappresentato da un diagramma riportante la forza di taglio totale alla base in funzione dello spostamento di un nodo rappresentativo, il quale, attraverso successivi procedimenti, permetterà un confronto con la domanda sismica richiesta per l'edificio.

## Bibliografia di riferimento

Circolare n. 617, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, “Istruzioni per l’applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M 14/01/2008», “Gazzetta Ufficiale” n. 47, 26/02/2009

DPCM-2008, “Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni”, supplemento ordinario n. 25, G.U. n. 24, 29.01.2008

DPCM-2011, “Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle NTC 2008”, G. U. n. 47, 26.02.2011

Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A., Resemini, S., “Non-linear Analysis of Masonry Structures”, Atti 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, 1-6 Agosto 2004

Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S., “TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings”, Engineering Structures 56 (2013), pp. 1787–1799

LL. GG. 2010 - Ministero dei Beni e le Attività Culturali, “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni”, Circolare n. 26, 23/07/2010

NTC-08, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministro dell’interno, Capo della Protezione Civile, Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14/01/2008, “Gazzetta Ufficiale” n. 29 del 4/02/2008

OPCM – DPC – “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”, n.3274/03, G.U. n. 252, 29/10/2003

Podestà, S., Curti, E., Parodi, S., D’Aristotile, M., “Sistema informativo per la valutazione del rischio sismico (SIVARS)”, in MiBAC, Atti della giornata di studio su «Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni», pp. 347-362, Roma, 15 giugno 2007

Podestà, S., “Verifica sismica di edifici in muratura”, Dario Flaccovio Editore, 2012

Tagliaferri, M. V., “I diversi livelli di valutazione della sicurezza sismica delle costruzioni storiche in muratura”, tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2014

