
L'uso delle prove diagnostiche per
una conoscenza approfondita delle
proprietà degli edifici storici

L' alto valore storico della maggior parte degli ambienti della Villa non ha sicuramente reso facile la determinazione delle prove da effettuare. La maggior parte delle strutture portanti verticali sono celate da strati piuttosto spessi di intonaco o perfino, in molti casi, da stucchi, boiserie, parati in stoffa e altri materiali. Stesso discorso per le strutture orizzontali, dove oltre alle pavimentazioni, che in alcuni casi si rilevano anche piuttosto complesse, è possibile incontrare finte volte e relative strutture lignee. La massiccia quantità di paramenti e rivestimenti in generale al piano rialzato e primo, antichi e di un certo valore, oltre a impedire la realizzazione di prove invasive, rende in molti casi inadeguate anche le prove non invasive. Indagini soniche e termografie risultano così inutili per la determinazione, per esempio, della tessitura muraria in questi piani.

Da questi ragionamenti, è stato redatto un progetto che cercasse di interagire quanto meno possibile con i fragili materiali storici del museo, concentrandosi così nel piano seminterrato, come abbiamo visto oggetto recentemente di lavori di ristrutturazione e rivestito quasi interamente da uno spesso strato di intonaco facilmente sostituibile. Per gli altri piani si erano privilegiate le prove non invasive, anche se in alcuni casi i dubbi riguardanti la natura delle strutture, soprattutto per quanto riguarda le volte, ha reso necessario il passaggio a prove leggermente più invasive e distruttive.

Andiamo ad elencare ora le diverse prove previste inizialmente piano per piano.

Piano seminterrato

Durante il periodo nel quale era previsto di svolgere le prove, abbiamo avuto la fortuna di incontrare una concomitante assenza di esibizioni e perciò di allestimenti particolari. Tranne gli spazi rettangolari di passaggio voltati a crociera, parzialmente chiusi da pannelli in cartongesso, e i depositi d'arte, usualmente chiusi e aperti temporaneamente su richiesta, tutti gli altri ambienti sarebbero stati continuamente a nostra disposizione.

Innanzitutto si era deciso di approfondire la geometria di archi e volte attraverso l'utilizzo di una stazione totale, per verificare la presenza di deformazioni e le connessioni tra i diversi elementi. L'indagine avrebbe dovuto riguardare tutti gli ambienti raggiungibili del piano. Sempre tra le indagini non distruttive, si era scelto di procedere con diverse prove termografiche con riscaldamento attivo, in modo da cercare di carpire le diverse tessiture murarie presenti, sia a livello di pareti che a livelli delle volte, soprattutto in occasione degli ammorsamenti delle pareti ortogonali. In particolare si era proposto di concentrare le osservazioni nella sala I6 e nella sala I10, soprattutto in corrispondenza degli angoli per verificare gli ammorsamenti; altre prove erano previste nella sala I8, per verificare la struttura originale che costituisce il Vestibolo al piano superiore; nel muro di collegamento tra la sala I4 e il deposito ovest, visto il delicato quadro fessurativo ai piani superiori, avendo cura di effettuare una controprova nel muro simmetricamente opposto tra la sala I12 e il deposito est; infine una prova era prevista nell'angolo sud-ovest della sala di passaggio I5, al fine di studiare l'ammorsamento.

Oltre alle prove termografiche erano state previste in origine sei prove soniche dirette in trasparenza per verificare la morfologia della tessitura muraria. In particolare prove su un'area 75x75 cmq erano da effettuare nel muro ovest della sala I6 e quello est della sala I10, al fine di verificare la compattezza della struttura; altre prove, possibilmente con la stessa area, erano da effettuare nello stesso punto delle indagini termografiche nella sala circolare I8 e nei muri nord dei due depositi; un'altra prova sonica, sempre con la stessa griglia, era prevista nel muro di controvento tra la sala I9 e la sala I10.

Le zone maggiormente caricate erano state individuate con le due sale negli angoli nord-ovest e nord-est dell'edificio, vista anche la presenza di quadri fessurativi piuttosto estesi ai piani superiori, soprattutto nell'ala ovest. Erano state così previste delle prove con martinetto piatto singolo nel

maschio murario ovest della sala I6 e in quello est della sala I10, in modo da ottenere allo stesso tempo i carichi agenti e la distribuzione dei carichi; non era infatti improbabile che le fessurazioni fossero una conseguenza di concentrazioni locali dello stato di sforzo agente nelle murature. Negli stessi punti andavano quindi effettuate delle prove con martinetto doppio, per ottenere il modulo elastico e, più in generale, caratterizzare meccanicamente le strutture. Nel caso dei martinetti doppi bisogna aggiungere che i due punti scelti si erano considerati perfetti per la verifica della risposta tenso-deformativa, visto che le porzioni in esame, secondo le fonti storiche, mantengono le loro caratteristiche originali; questa caratteristica, visto che l'edificio presenta una certa omogeneità costruttiva, avrebbe permesso di estendere i risultati ottenuti a tutte le altre murature portanti.

Era stata consigliata un'ulteriore prova con martinetto singolo nell'ala maggiormente lesionata; tuttavia la localizzazione e l'eventuale esecuzione sarebbe stata a giudizio del gruppo di ricerca esecutivo delle prove.

La prova con il martinetto richiedeva rimozioni di intonaco piuttosto consistenti, più o meno di un'area di 60x80 cmq, oltre che naturalmente ai tagli necessari all'inserimento del martinetto. Per i tagli era stata prevista una ristilatura immediata con malta espansiva da parte degli esecutori delle prove, mentre per le rimozioni di intonaco si era preferito delegare il ripristino ad un'impresa specializzata nella realizzazione delle finiture, per evidenti motivi estetici.

Prima delle suddette fasi di ripristino, si era consigliato però il prelievo di parte del materiale di costruzione per delle prove di caratterizzazione in laboratorio. In particolare si era raccomandato il prelievo della malta per le prove granulometriche e le analisi chimiche per lo studio della composizione della miscela; inoltre, se possibile, bisognava procedere alla rimozione di un concio di tufo per le caratterizzazioni fisiche e meccaniche.

Vista la presenza di spessori piuttosto consistenti, sia a livello dei solai che dei maschi murari, si era deciso di procedere con altre indagini piuttosto invasive, al fine di determinare le diverse stratigrafie esistenti. In particolare erano stati prescritti quattro carotaggi, possibilmente di diametro con spessore superiore ai 50 mm in modo da permettere successive prove in laboratorio; nei fori così prodotti si sarebbe dovuti procedere con un'ispezione mediante video-endoscopio. I punti designati erano

localizzati nella parete di passaggio tra la sala I5 e la sala I6, dalla parte della sala I5, e nella parete di controvento oggetto della sonica, quella tra la sala I9 e la sala I10, dalla parte della sala I9.

Anche in questo caso era stata delegata ad un'impresa specializzata che ricollocasse nel caso dei conci in pietra di tufo, il materiale carotato più prossimo alla superficie, e in ogni caso sigillasse il foro e ripristinasse l'intonaco di rivestimento.

Leggermente meno distruttive erano le endoscopie previste per lo studio della stratigrafia interna e delle tecniche costruttive di volte e archi: in questo caso era previsto la realizzazione di fori tramite l'uso di un trapano con punta di spessore 8 mm. Per gli archi erano da realizzare due fori nelle due direzioni ortogonali, mentre per le volte sempre due fori, ma uno alle reni e uno in chiave. Inizialmente le suddette erano previste nella volta della sala I2, I5, I6 (in corrispondenza della voltina a vela centrale) e in quella della sala I12; gli archi oggetto di esame invece erano quello della sala I3 e quello di passaggio tra la sala I4 e quella I5.

Per evidenti ragioni estetiche, il ripristino dell'intonaco di rivestimento era stato delegato ad un'impresa specializzata.

Infine, in caso di esito negativo delle prove termografiche finalizzate alla verifica degli ammorsamenti, si era prescritto il passaggio alla rimozione parziale dell'intonaco nei quattro spigoli in esame. Anche in questo caso, il ripristino dello stesso intonaco era stato delegato ad un'impresa specializzata.

Piano rialzato

Come già anticipato, le prove al piano rialzato sono dovute essere, per necessità, molto più essenziali e meno invasive. La presenza massiccia di paramenti e rivestimenti di una certa delicatezza e valore, oltre che di moltissimi oggetti espositivi, ha impedito la progettazione di un impianto di prova maggiormente complesso.

In particolare erano stata prevista una sola prova termografica con riscaldamento attivo nella parete di separazione tra la Biblioteca e la saletta ovale, dato che si avevano dubbi sulla costituzione e sullo spessore delle murature relative alle due ali meridionali dell'edificio.

Ben più consistenti le prove soniche dirette, di cui ne erano state previste quattro. Due di esse, al fine di

conoscere la morfologia della muratura, dovevano essere compiute su una griglia 75x75 cmq localizzata nelle pareti interne dell'edificio, e in particolare in corrispondenza della parete ovest della Sala pranzo e sullo stesso muro oggetto della prova termografica tra la Biblioteca e la saletta ovale.

Le altre due invece erano finalizzate alla comprensione dei pilastri dei Portici sud e di quelli della Verandina a nord. In realtà per i Portici sud era da considerare prima la realizzazione di una prova ultra-sonica di trasparenza, e solo all'occorrenza una prova sonica: vista la difficoltà ad interpretare la composizione dei pilastri era stato infatti vista come necessaria un'interpretazione delle velocità, in modo da comprendere se si trattasse di coni lapidei unici o invece di murature composte. Per i pilastri della Verandina presentano invece caratteristiche abbastanza uniche nella Villa, ed era perciò stato considerato probabile che fossero state assemblate con tecniche differenti. Si era pensata così di organizzare l'esame su diverse file orizzontali parallele per vedere anche solamente se la lesena e la semicolonna siano correttamente addossati alla struttura principale o siano semplicemente in appoggio.

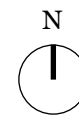
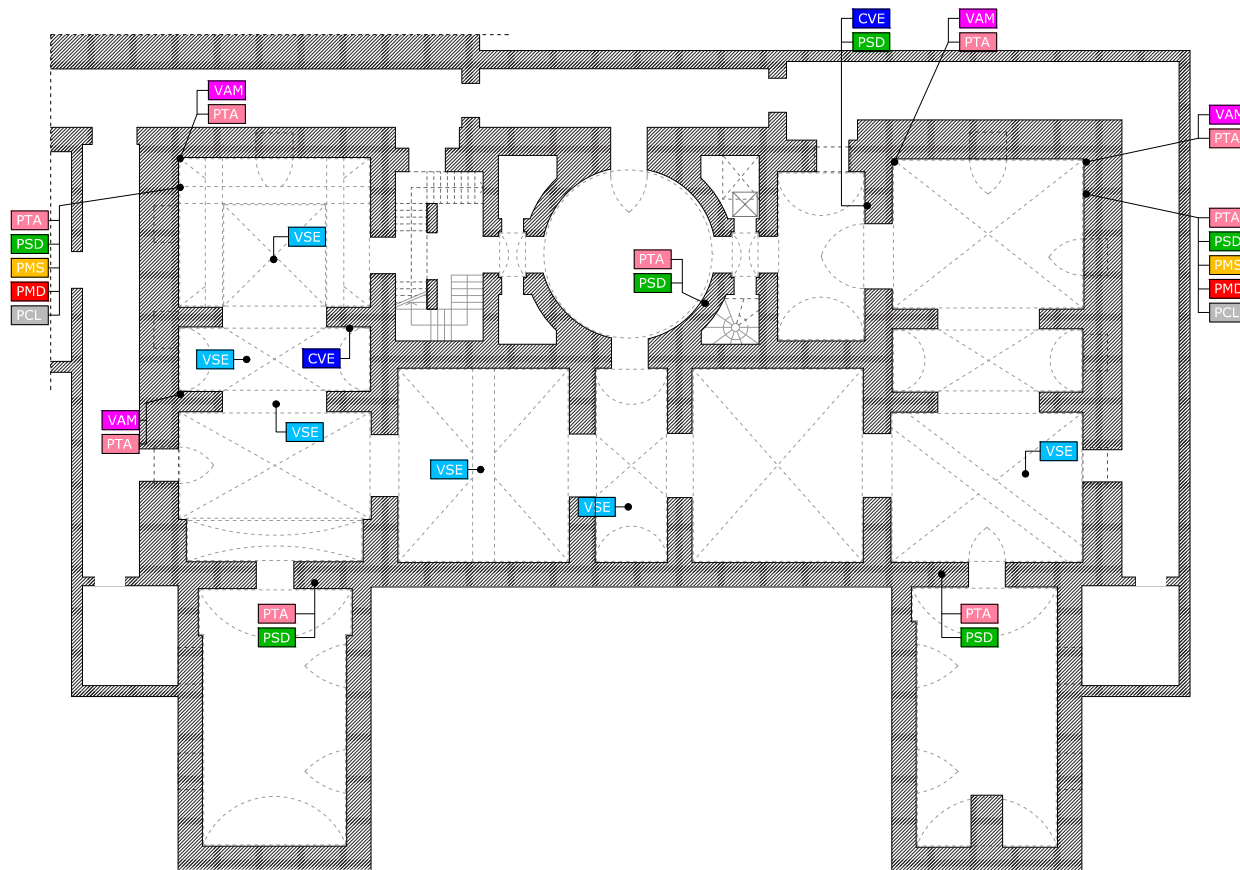
Infine erano state viste come necessarie solo alcune prove lievemente invasive, rappresentate da alcune endoscopie finalizzate alla determinazione delle strutture principali del piano. Di particolare importanza erano viste le endoscopie alle volte, visti i parecchi dubbi che vertevano la stratigrafia e la reale composizione di queste ultime. Erano stati previsti dei fori dello stesso spessore dei corrispondenti al piano seminterrato (8 mm), in corrispondenza dei punti di giunzione delle decorazioni in stucco delle volte nella Sala verde, nella Sala rossa e nell'ambiente maggiore della Sala delle feste, oltre che nella volta della Sala da pranzo.

Un'unica endoscopia era prevista per la determinazione della stratigrafia della muratura, e precisamente nella parete meridionale della Sala pompeiana.

Piano primo

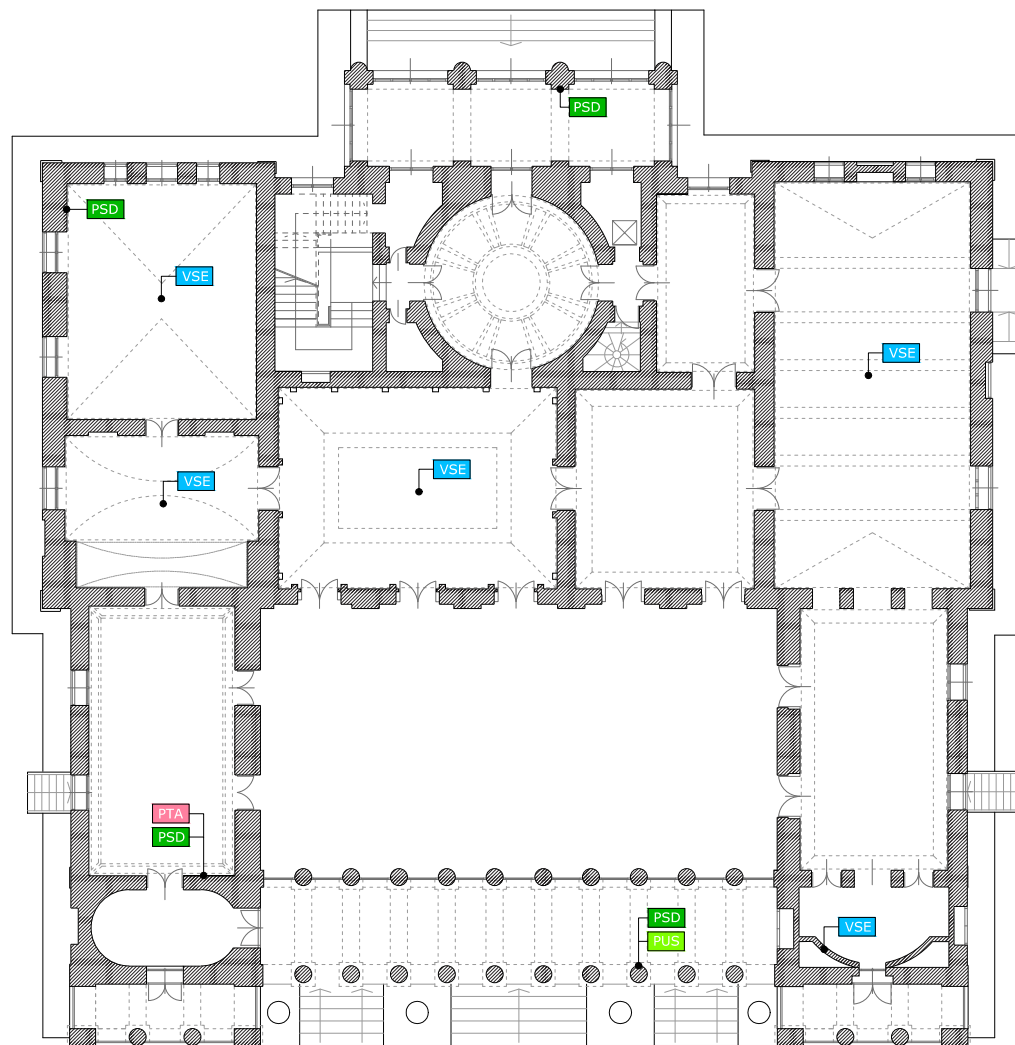
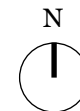
Al piano primo, vista la presenza dei soliti paramenti e rivestimenti, vista la difficoltà ad accedere nei diversi ambienti, e la conseguente concentrazione degli esami ai piani inferiori, le prove proposte sono state davvero poche e totalmente non invasive.

Erano state pensate cinque prove termografiche con riscaldamento attivo, di cui due realizzate nella parete sud del Boudoir, una nell'ambiente centrale sovrastante il Vestibolo e due nella sala nell'angolo nord-est. Le prove nel progetto avevano il ruolo di verifica dell'omogeneità della tessitura muraria con i piani inferiori, e in parte, soprattutto nel boudoir e nella sala a nord-est, di verifica degli ammorsamenti. Le prove soniche di trasparenza erano invece solo due, e localizzate in corrispondenza dei balconi nella parete sud del Boudoir e nella parete nord dell'ambiente centrale oggetto della termografia. Entrambe le prove avrebbero dovuto basarsi sull'usuale griglia 75x75 cmq e avrebbero dovuto dare indicazioni più precise sulla morfologia della parete.



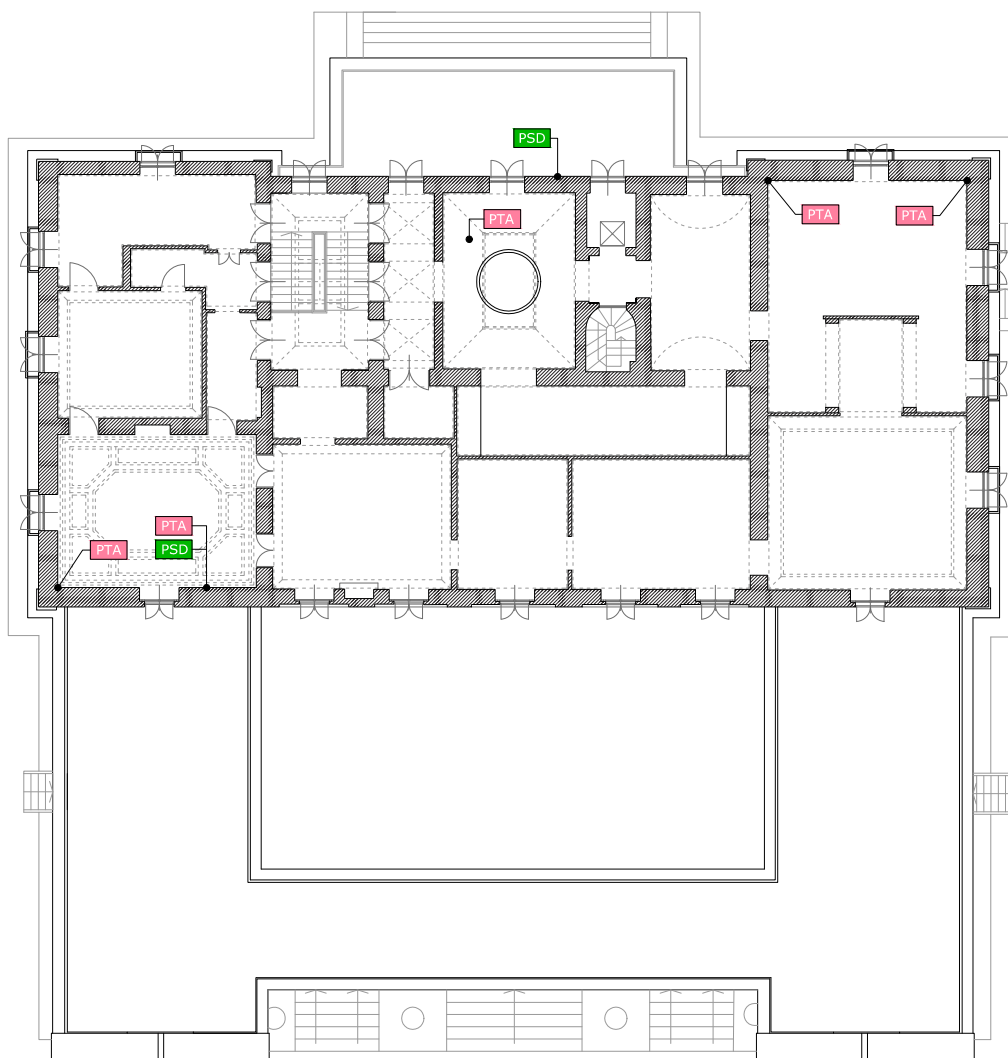
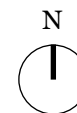
- Prove Termografiche con riscaldamento Attivo*
- Prove Soniche Dirette*
- Prove Ultra-Soniche*
- Prova con Martinetto piatto Singolo*
- Prova con Martinetto Doppio*
- Verifica della Stratigrafia delle strutture con Endoscopio*
- Carotaggio e osservazione con Video-Endoscopio*
- Verifica degli Ammorsamenti della Muratura*
- Prove Resistografiche su strutture Lignee*
- Prelievo di materiale e Caratterizzazione in Laboratorio*

4.1. Localizzazione delle indagini al piano seminterrato secondo il primo progetto diagnostico



- PTA *Prove Termografiche con riscaldamento Attivo*
- PSD *Prove Soniche Dirette*
- PUS *Prove Ultra-Soniche*
- PMS *Prova con Martinetto piatto Singolo*
- PMS *Prova con Martinetto Doppio*
- VSE *Verifica della Stratigrafia delle strutture con Endoscopio*
- VSE *Carotaggio e osservazione con Video-Endoscopio*
- VAM *Verifica degli Ammorsamenti della Muratura*
- PRS *Prove Resistografiche su strutture Lignee*
- PCL *Prelievo di materiale e Caratterizzazione in Laboratorio*

4.2. Localizzazione delle indagini al piano rialzato secondo il primo progetto diagnostico



- PTA *Prove Termografiche con riscaldamento Attivo*
- PSD *Prove Soniche Dirette*
- PUS *Prove Ultra-Soniche*
- PMS *Prova con Martinetto piatto Singolo*
- PDS *Prova con Martinetto Doppio*
- VSE *Verifica della Stratigrafia delle strutture con Endoscopio*
- VAM *Carotaggio e osservazione con Video-Endoscopio*
- VAM *Verifica degli Ammassamenti della Muratura*
- PCL *Prove Resistografiche su strutture Lignee*
- PCL *Prelievo di materiale e Caratterizzazione in Laboratorio*

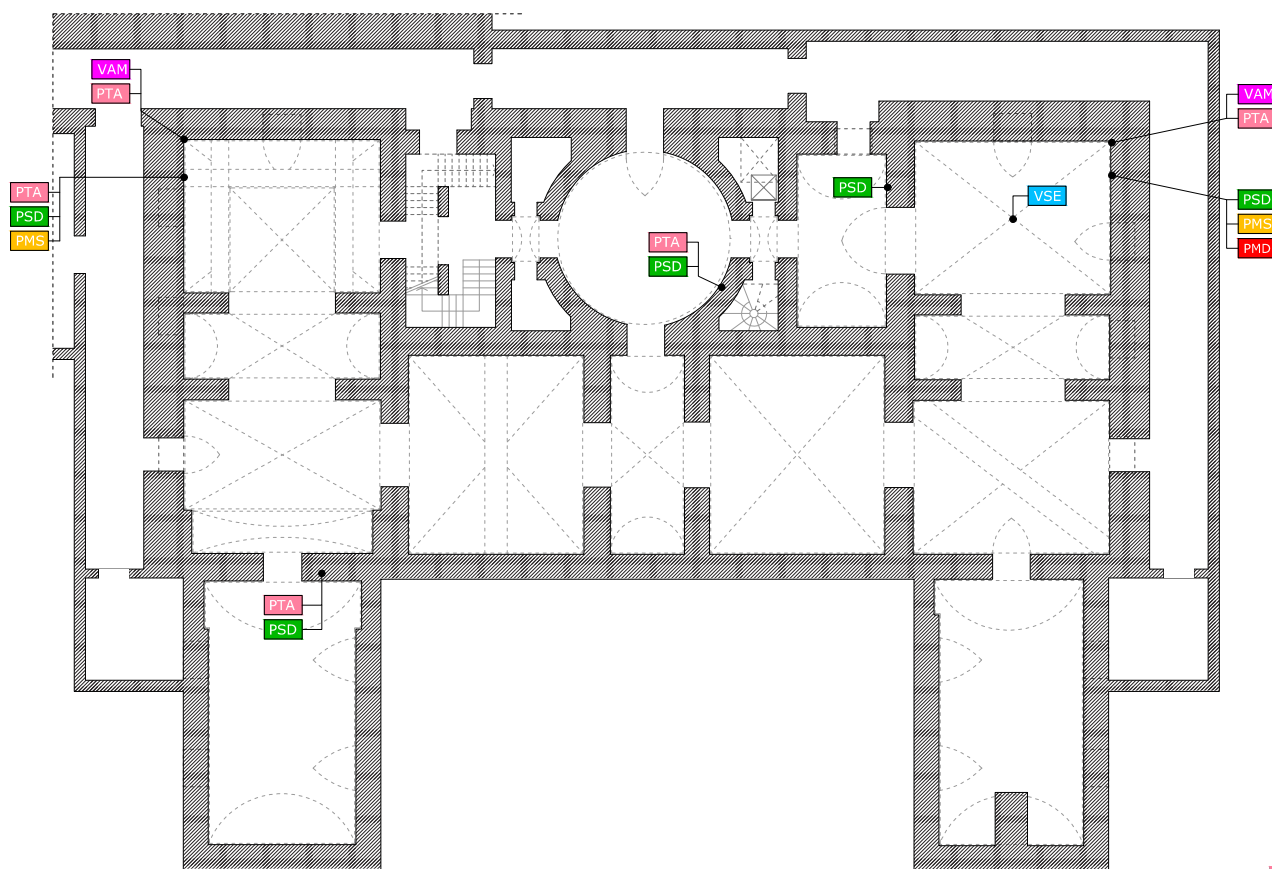
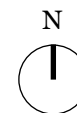
4.3. Localizzazione delle indagini al piano primo secondo il primo progetto diagnostico

Varianti di progetto

Come vedremo successivamente, solo una parte delle prove fin qui elencate saranno effettivamente realizzate. In realtà, infatti, il piano definitivo è stato il risultato di un confronto con i responsabili della struttura, i quali, per il rispetto dell'edificio storico e considerando le successive difficoltà che il ripristino avrebbe richiesto, hanno dovuto impedire alcune delle indagini, soprattutto quelle più invasive. Inoltre alla fine i giorni disponibili per l'esecuzione delle prove si sono rivelati minori di quelli previsti, rendendo impossibile l'espletamento di uno studio così completo. Ai redattori del progetto è stato quindi chiesto di effettuare una massiccia scrematura, in modo da ottenere risultati comunque risultati soddisfacenti con un minor numero di indagini, soprattutto quelle invasive.

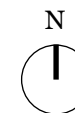
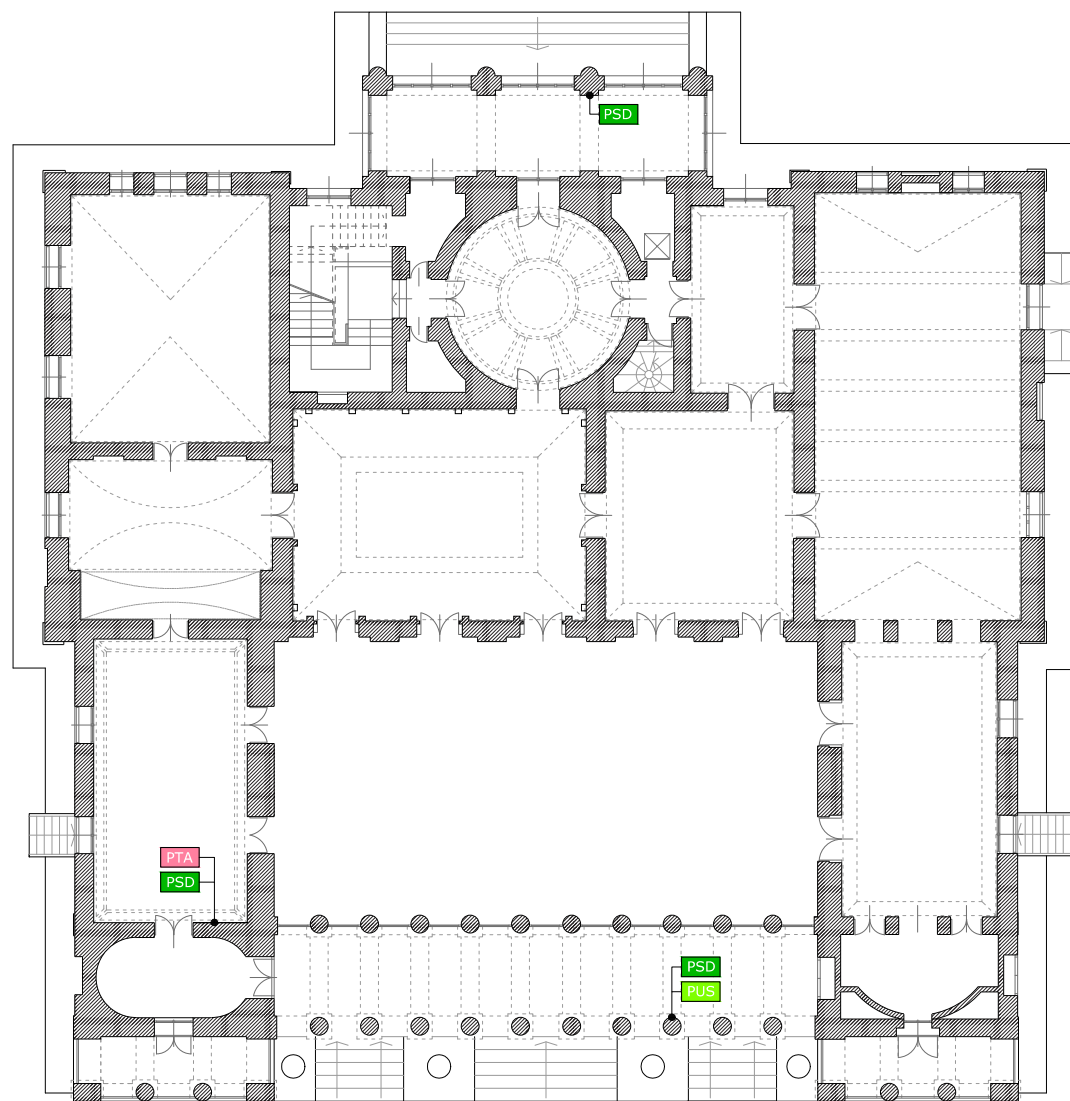
Per questi motivi dal progetto definitivo vediamo eliminati tutti i carotaggi, la totalità delle endoscopie al piano rialzato e gran parte delle endoscopie al seminterrato, alcune verifiche degli ammorsamenti, la prova con martinetto doppio nell'ala ovest del seminterrato, tutte le prove al piano primo, e alcune altre prove non invasive, soprattutto soniche, sia al piano seminterrato che rialzato.

Da segnalare, tuttavia, che è stato possibile, grazie a concessioni ottenute dai tecnici in situ, eseguire alcune prove supplementari e non previste nel progetto iniziale, che hanno permesso di ottenere in ogni caso risultati, come vedremo, abbastanza soddisfacenti.



- PTA *Prove Termografiche con riscaldamento Attivo*
- PSD *Prove Soniche Dirette*
- PUS *Prove Ultra-Soniche*
- PMS *Prova con Martinetto piatto Singolo*
- *Prova con Martinetto Doppio*
- VSE *Verifica della Stratigrafia delle strutture con Endoscopia*
- *Carotaggio e osservazione con Video-Endoscopia*
- VAM *Verifica degli Ammorsamenti della Muratura*
- *Prove Resistografiche su strutture Lignee*
- PCL *Prelievo di materiale e Caratterizzazione in Laboratorio*

4.4. Localizzazione delle indagini al piano seminterrato secondo il progetto oggetto di riduzioni



- PTA
 - PSD
 - PUS
 - PMS
 - PMS
 - VSE
 - VSE
 - VAM
 - PMS
 - PCL
- Verifica della Stratigrafia delle strutture con Endoscopio*
Carotaggio e osservazione con Video-Endoscopio
Verifica degli Ammassamenti della Muratura
Prove Resistografiche su strutture Lignee
Prelievo di materiale e Caratterizzazione in Laboratorio

4.5. Localizzazione delle indagini al piano rialzato secondo il progetto oggetto di riduzioni

4.2

Rassegna dei metodi di prova proposti per lo studio della Villa

Le prove sono state effettuate nell'arco di due giorni, e per la precisione il 17 e il 19 giugno 2014, ad opera di un gruppo di tecnici composto dal geometra Marco Cucchi, e dai signori Massimo Iscandri, Antonio Cocco e Paolo Broglia, coadiuvati dall'architetto Claudia Tiraboschi, e appartenenti al settore "Diagnostica per il costruito e beni culturali" del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano. Il geom. Cucchi e l'arch. Tiraboschi apparivano in possesso del certificato di livello 3 CICPND (Centro Italiano di Certificazione per le Prove non Distruttive e per Processi Industriali) per prove con martinetti piatti e di qualifica di operatore per CND livello 2, nel metodo TT Termografia Infrarossa per il settore civile, elettrico, industriale e meccanico.

Io stesso ho partecipato ad entrambi i giorni di prove, accompagnando il gruppo in tutte le operazioni e supportandolo in diversi modi. Il mio compito innanzitutto consisteva nel registrare le diverse fasi delle prove attraverso fotografie e schizzi. Quindi ho partecipato ad alcune delle stesse fasi, sia passivamente, registrando per esempio i dati ottenuti o le misurazioni delle localizzazioni delle prove, che attivamente, soprattutto per quanto riguarda le prove termografiche e soniche.

Verranno ora brevemente descritte i principi delle indagini attuate e gli strumenti utilizzati.

Indagini termografiche

La termografia è una tecnica non distruttiva che opera utilizzando la banda delle radiazioni infrarosse. Ogni materiale emette energia tramite radiazioni elettromagnetiche, in quanto caratterizzato da una propria conducibilità termica, e da un proprio calore specifico. Ogni elemento o strato che caratterizza una parete, una volta riscaldato, è caratterizzato da temperature differenti in base alla conducibilità e al calore specifico di ogni singolo componente. L'analisi termografica può essere condotta in modo passivo, analizzando cicli termici naturali (insolazione e successivo raffreddamento), ed in modo attivo, scaldando artificialmente la superficie da analizzare. La termografia rileva e suddivide le radiazioni infrarosse emesse spontaneamente dai singoli punti di un corpo caldo, in un certo istante; il rilevamento viene registrato da una speciale apparecchiatura che fornisce un'immagine termica dell'oggetto attraverso scale di colori o di grigi. Ad ogni colore o tono della scala di grigi corrisponde un intervallo di temperatura che generalmente è nell'ordine di frazioni di grado centigrado. Il flusso totale di energia E , emesso da una superficie, è la somma dell'energia E_c emessa dalla superficie dell'oggetto per eccitazione termica e del flusso di energia E_r che proviene dall'emissione delle superfici circostanti e che viene a sua volta dispersa nell'ambiente, secondo la formula $E = E_c + E_r$.

In virtù di questa definizione, le apparecchiature all'infrarosso impiegate nella prova, nonostante l'elevata risoluzione termica, rilevano la distribuzione delle temperature dovute al flusso di energia E . Nella presente relazione, di conseguenza, le temperature misurate tramite la termocamera non possono essere considerate come temperature assolute. Le apparecchiature all'infrarosso misurano il flusso di energia E a distanza, senza alcun contatto fisico con la superficie esaminata. Nel caso specifico è stata utilizzata una termocamera modello Testo 890. Le prove sono state condotte con tecnica attiva e passiva. La tecnica attiva prevede il riscaldamento delle superfici da esaminare mediante termoconvettore posizionato in prossimità delle superfici da esaminare. Dopo aver scaldato la superficie da esaminare per circa un'ora, il dispositivo per riscaldare viene spento e la prova è condotta tramite frequenti acquisizioni di immagini termografiche delle aree inquadrare, durante il successivo periodo di raffreddamento. In virtù delle diverse caratteristiche termiche possedute dai materiali che compongono gli strati più esterni di pareti e soffitti, le temperature cedute verso l'ambiente da pietre,



4.6. Termocamera impiegata



laterizi, giunti di malta e calcestruzzo danno forma alle strutture celate dall'intonaco.

Indagini soniche

Le prove soniche sono indagini non distruttive utilizzate allo scopo di caratterizzare e descrivere qualitativamente la muratura. Il principio dell'indagineonica si basa su alcune relazioni che legano la velocità di propagazione delle onde elastiche in un mezzo materiale, alle proprietà elastiche del mezzo stesso. La velocità di propagazione delle onde elastiche è infatti direttamente correlabile alle proprietà elastiche e alla densità del mezzo stesso, ma solo se il mezzo attraversato è elastico, omogeneo ed isotropo. Quando un trasduttore colpisce una superficie solida, le onde elastiche si propagano all'interno del materiale lungo traiettorie longitudinali (onde di compressione) e trasversali (onde di taglio); data la maggior velocità delle onde longitudinali e le caratteristiche delle strumentazioni, le indagini soniche si limitano alla loro analisi. Per un mezzo infinitamente omogeneo, elastico ed isotropo, la velocità delle onde di compressione è pari alla seguente relazione:

$$V = \sqrt{\frac{K \cdot E_d}{\rho}}$$

V = velocità delle onde di compressione

$$K = \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}$$

E_d = Modulo Elastico Dinamico

ρ = densità

ν = Coefficiente di Poisson Dinamico

Nella strumentazione impiegata nell'ambito delle presenti prove, le onde elastiche sono generate dalla percussione di un apposito martello strumentato sulla superficie muraria. La propagazione nel mezzo di tali onde è quindi rilevata tramite accelerometri, che permettono di acquisire e registrare le varie forme d'onda. La propagazione delle onde elastiche nella muratura dipende dalla morfologia della struttura muraria e dallo stato di danneggiamento. In particolare, quando la muratura presenta discontinuità (fessure, vuoti, distacchi tra paramenti murari), la velocità di propagazione delle onde diminuisce, perché il mezzo risulta meno denso.

Le indagini soniche sono state condotte utilizzando la seguente attrezzatura: un trasmettitore (martello

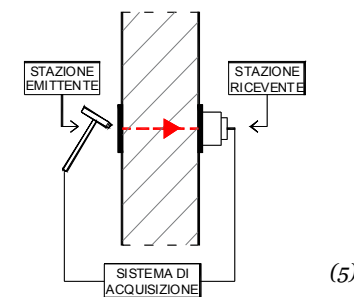
4.7. Martello e accelerometro utilizzati durante le indagini della Villa

strumentato Dytran – modello 5801A5) per la generazione dell'impulso; un ricevitore (accelerometro Bruel & Kjaer - modello 4370) per la ricezione dell'impulso; un Personal Computer portatile per l'acquisizione dei segnali mediante scheda National Instruments dedicata.

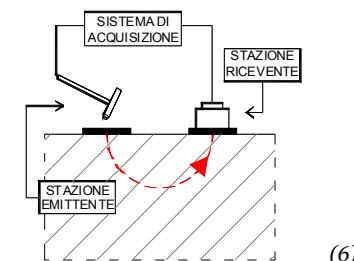
Il primo passo nelle prove prevede l'individuazione dell'area di prova e la localizzazione di due griglie di punti corrispondenti, rispettivamente per la generazione delle onde elastiche e la loro acquisizione. In ognuno dei punti della prima griglia si percuote la superficie con un apposito martello strumentato per generare un impulso. In tal modo si propagano nello spessore murario onde elastiche che, per le applicazioni sulla muratura, hanno frequenze nell'intorno di circa 3.5 kHz. L'intensità dell'impulso generato e la sua frequenza, dipendenti dalle caratteristiche della strumentazione adottata, ad esempio il materiale scelto per la punta del martello e dell'area d'impatto, sono rilevabili attraverso un trasduttore di forza incorporato nel martello stesso. Il tempo di propagazione dell'onda elastica nella sezione muraria è misurato tramite un accelerometro posizionato nella griglia di acquisizione.

A questo punto le indagini soniche possono essere condotte secondo tre modalità, per trasparenza, di superficie, o per trasmissione radiale, in base al posizionamento del trasmettitore e del ricevitore sulla superficie muraria. Nel nostro caso, avendo adottato come metodo quello dell'indagine sonica per trasparenza, il ricevitore, rappresentato dall'accelerometro, è posizionato sulla superficie opposta (prova per trasparenza) della muratura. Quindi la velocità di propagazione dell'onda elastica è calcolata dividendo la distanza tra i punti di generazione e di acquisizione, nel caso specifico lo spessore della sezione muraria attraversata, per il tempo di percorrenza.

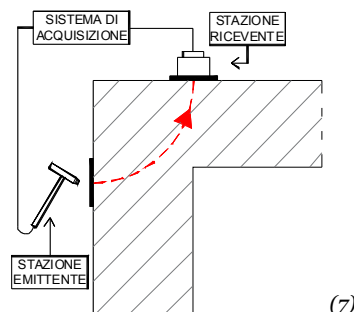
Il dato fornito dalle prove è la velocità di propagazione delle onde nelle murature, la cui variazione è legata alla densità del mezzo ed è un indice significativo delle qualità murarie. Come precedentemente indicato, si rileva una diminuzione della velocità di propagazione quando nel materiale sono presenti zone aventi minore densità, vuoti o cavità. La prova sonica sono state eseguite secondo una maglia regolare di 36 punti (6 righe e 6 colonne con punti distanti tra loro 15 cm circa). Nel caso di indagini in superficie l'accelerometro è stato mantenuto in posizione fissa nel primo punto della riga (in direzione orizzontale) o della colonna (in direzione verticale) e l'impulso è stato applicato a distanze crescenti, pari a 15, 30, 45, 60, 75 cm.



(5)



(6)



(7)

4.8. Schema raffigurante le modalità di esecuzione dell'indagine sonica: per trasparenza (5), di superficie (6), per trasmissione radiale (7)



Prova con martinetto piatto singolo

La prova con il martinetto piatto singolo consente l'individuazione dello stato di sforzo locale di compressione presente nella muratura. Consiste nel provocare il rilascio delle tensioni e quindi una variazione locale della geometria superficiale della muratura, praticando un taglio piano orizzontale nella stessa. L'ipotesi su cui si basa tale tecnica è che la pressione necessaria per riportare la muratura alla configurazione indeformata iniziale (applicata tramite un martinetto piatto) corrisponda al valore di sollecitazione preesistente nella muratura. La grandezza di riferimento è la variazione di distanza tra le basi di misura poste in verticale a cavallo del taglio. Dopo aver misurato la distanza iniziale tra le basi, si procede eseguendo un taglio. Rilevata la convergenza delle superfici del taglio attraverso la rilettura della distanza tra le basi di misura, si inserisce nella fessura aperta nella muratura un martinetto collegato ad una pompa a mano e si incrementa quindi la pressione fino al ripristino della geometria iniziale. Rilevato il valore di pressione corrispondente all'annullamento della convergenza provocata dal taglio, si diminuisce la pressione fino a scaricare la muratura. Tale ciclo di carico e scarico viene ripetuto due volte: la prima volta la pressione viene aumentata lentamente, in 10-20 minuti circa (pari al tempo impiegato per l'esecuzione del taglio e l'inserimento del martinetto); la seconda volta l'intero ciclo viene completato in pochi minuti. Il valore dello stato di sforzo è calcolato con la seguente relazione:

$$\sigma_m = P \cdot K_a \cdot K_m$$

P = pressione del martinetto che permette di ristabilire la distanza iniziale tra le basi, misurata in bar (media dei valori di pressione corrispondenti ad uno spostamento nullo delle quattro basi di misura, ottenuti per interpolazione).

K_a = costante adimensionale che rappresenta il rapporto tra l'area del martinetto e l'area del taglio nella muratura;

K_m = costante adimensionale, dipendente dalla geometria e dalla rigidità del martinetto, riportata sul certificato di taratura del martinetto stesso.

4.9. La sega circolare a disco diamantato eccentrico e il martinetto piatto (350 x 260 x 4 mm) utilizzati per le prove

Il taglio nella muratura è stato realizzato mediante una sega circolare a disco eccentrico.

Per tutte le prove sono stati utilizzati martinetti di dimensione 350 x 260 x 4 mm con costante K_m

media di taratura pari a 0.86. La variazione della distanza tra i punti di riferimento fissati a cavallo del martinetto è stata rilevata con un deformometro digitale millesimale di tipo rimovibile su base 250 mm. Il sistema di carico era costituito da una pompa a mano dotata di manometro e collegata al martinetto. La pressione è stata incrementata per passi discreti pari a 1 bar.

Per l'esecuzione della prova con martinetto singolo, e quella successiva con martinetto doppio, si è seguita una procedura interna del Politecnico di Milano, risultato di una ricerca coordinata dalla prof.ssa Luigia Binda e basata sulle norme ASTM e RILEM adattate alle murature storiche.

Prova con martinetto doppio

La prova con martinetto doppio parte di solito dal taglio effettuato per la prova con martinetto singolo. Dopo aver eseguito il primo taglio per l'inserimento del martinetto si pratica nella muratura un taglio parallelo al primo in modo da isolare un campione di muratura di dimensioni pari a circa 350 x 500 mm. Il blocco di muratura viene sottoposto a compressione monoassiale mediante i due martinetti collegati allo stesso sistema idraulico. Si effettuano cicli di carico e scarico a livelli di sollecitazione sempre crescenti fino al superamento del limite elastico o a volte fino a raggiungere il valore di prima fessurazione di muratura (se il carico di contrasto lo permette). Una serie di trasduttori posizionati tra i due martinetti misura in continuo la deformazione corrispondente alla pressione applicata. Anche per la prova con martinetti doppi sono stati utilizzati martinetti di 350 x 250 x 4 mm, con costante di taratura media pari a 0.86. Come nella prova con un martinetto singolo, il taglio è stato realizzato mediante una sega circolare a disco eccentrico. La deformazione della muratura compresa tra i due martinetti è stata rilevata con 5 trasduttori di spostamento, di cui quattro posti in verticale ed uno in orizzontale su basi di misura di lunghezza variabile, in modo da permettere adattamenti alla situazione locale, come indicato nello schema che accompagna il diagramma sforzi-deformazioni relativo ad ogni prova. Il sistema idraulico per l'applicazione della pressione era costituito da una pompa a mano dotata di manometro e collegata al martinetto. La pressione è stata applicata con cicli di carico e scarico a livelli via via crescenti con passi discreti pari a 2 bar e registrata in automatico, contemporaneamente alle corrispondenti letture degli spostamenti, mediante una centralina di acquisizione dati collegata a un calcolatore portatile.

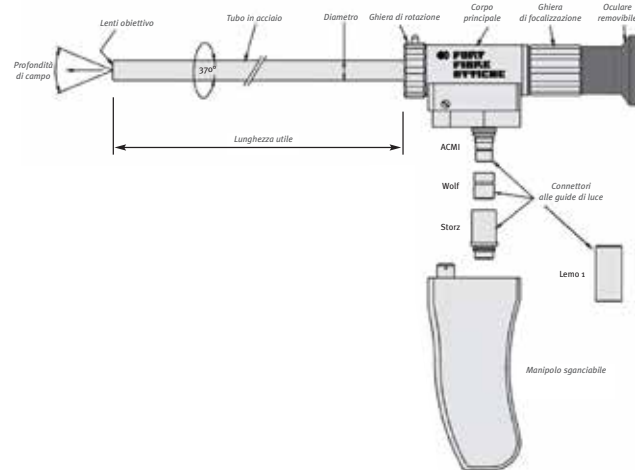


4.10. *Trasduttori di spostamento applicati alla muratura durante la prova con martinetto doppio*



Endoscopia

Inizialmente sono stati realizzati dei fori con un trapano con punta di diametro 18 mm, che sono stati quindi puliti e liberati dal materiale residuo mediante pompa meccanica e aspiratore elettrico. L'ispezione è avvenuta tramite endoscopio Fort fibre ottiche, di lunghezza fissa di 42 cm, provvisto di una lampada alogena a bassa tensione per l'illuminazione incorporata negli obiettivi. Il sistema ottico è costituito da lenti acromatiche a bassa attenuazione di luce ed il sistema di focalizzazione è regolabile da 3 mm ad infinito. Per l'occasione è stato utilizzato un obiettivo a vista frontale. L'endoscopio è dotato di riferimento metrico per il controllo della posizione di avanzamento all'interno del foro e può essere connesso ad una videocamera o a un videoregistratore per l'acquisizione delle immagini. I risultati delle indagini sono stati rappresentati direttamente in cantiere sulla base delle osservazioni compiute con lo strumento per ciascun foro. Successivamente le informazioni acquisite sono state restituite graficamente mediante programmi di grafica vettoriale per la presentazione dei risultati.



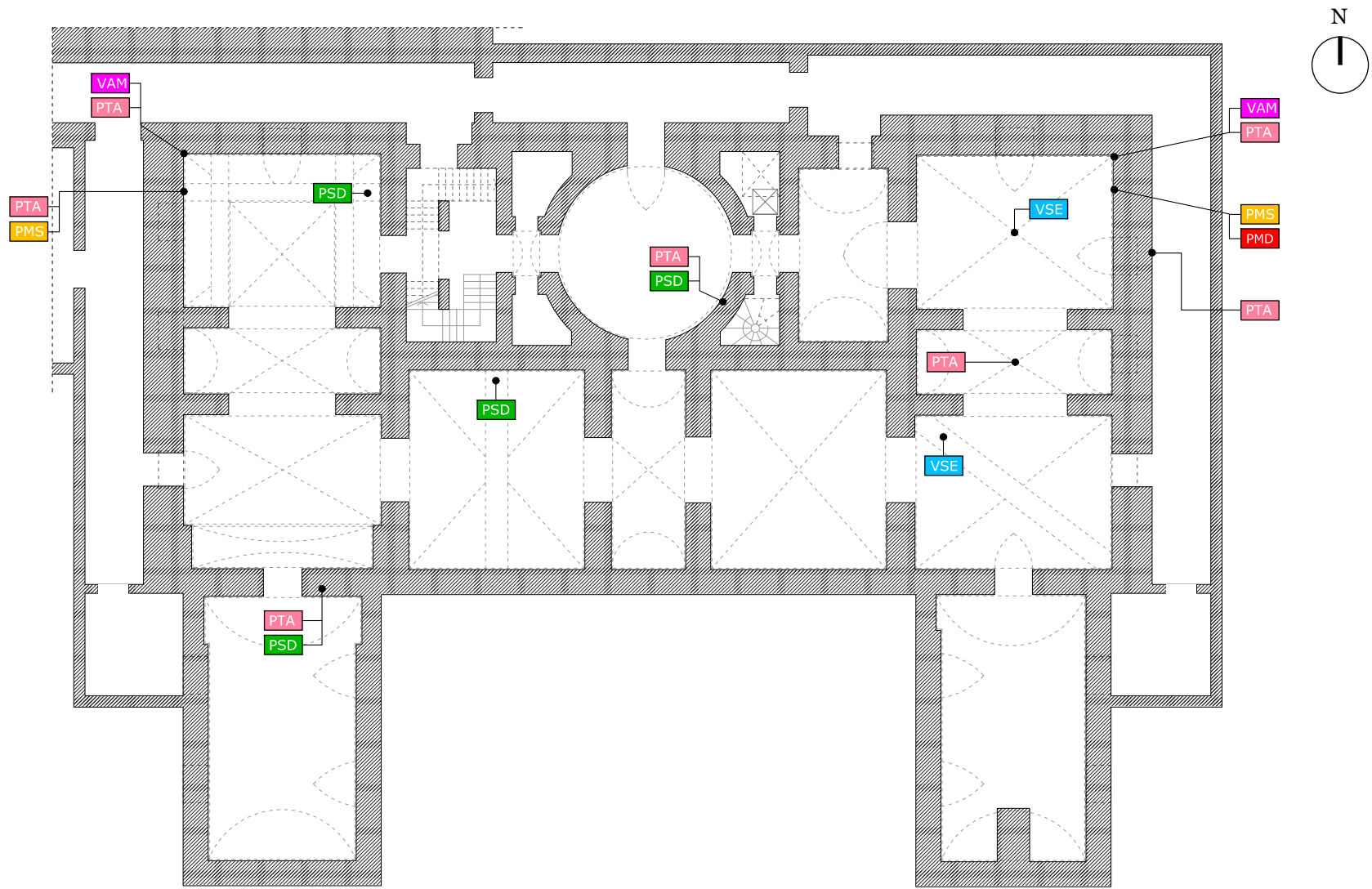
4.11. Fasi dell'esame endoscopico, con esecuzione dei fori con trapano a percussione e successiva ispezione con endoscopio

4.12. Endoscopio Fort fibre ottiche utilizzato nelle indagini

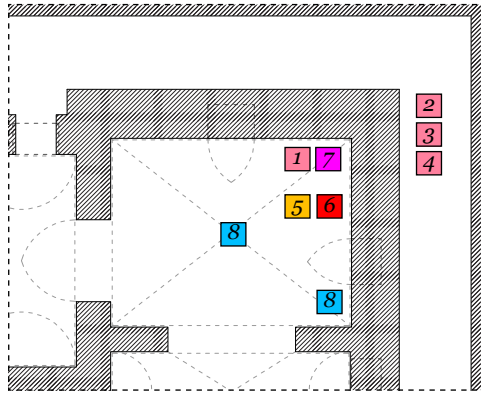
Sebbene nella relazione di progetto i risultati delle prove siano stati esposti divisi per tipologia di prova, in questa tesi si è ritenuto più utile riportarli non solo con una divisione piano per piano, ma anche sala per sala. In questo modo si è resa possibile una narrazione meno schematica, che mette in luce la relazione anche temporale tra le diverse prove e le diverse problematiche incontrate e i successivi ragionamenti che ci hanno spinto ad effettuare certe scelte nell'esecuzione delle stesse.

Come già più volte anticipato, il piano seminterrato è quello dove si è riusciti ad effettuare più prove e di cui, di conseguenza, si è ricostruito il quadro più fedele. Vista la particolare efficienza del gruppo di lavoro e le ulteriori concessioni da parte dell'amministrazione della Villa, è stato possibile effettuare alcune indagini supplementari rispetto al progetto considerato come definitivo. Queste, tuttavia, non sono state scelte tra quelle precedentemente individuate, dato che queste ultime, prese singolarmente, perdevano il loro valore conoscitivo. Attraverso un confronto in tempo reale con i progettisti si è scelto così di procedere con delle nuove prove che permettessero di raccogliere parte di quelle informazioni che il progetto originario intendeva carpire.

Andiamo ora ad analizzare le indagini sala per sala.

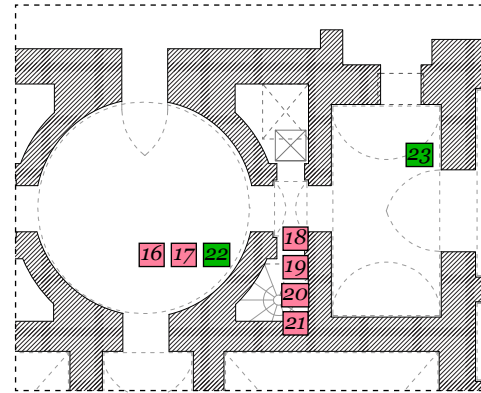


4.13. Localizzazione delle prove effettuate al piano seminterrato e (a fronte) abaco completo con numerazione



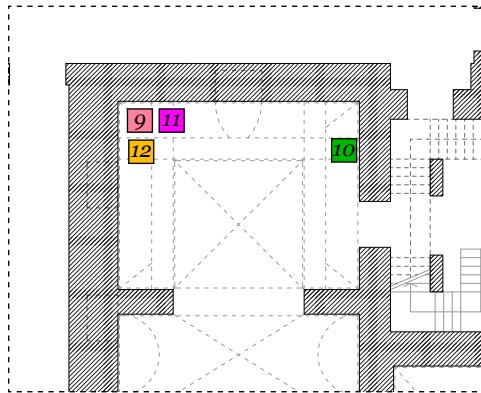
Sala I10

- PTA 1 Termografia I10
- 2 Termografia Corr_1
- 3 Termografia Corr_2
- 4 Termografia Corr_3
- PMS 5 Martinetto Singolo I10
- 6 Martinetto Doppio I10
- VAR 7 Verifica Ammorsamento I10
- VSE 8 Endoscopia I10 (Reni+Chiave)



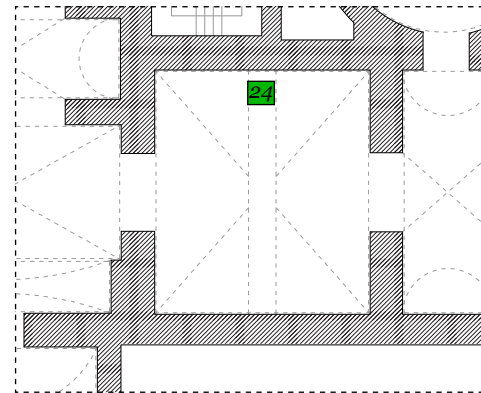
Sala I18 e Sala I19

- PTA 16 Termografia I18_1
- 17 Termografia I18_2
- 18 Termografia Nicchia_1
- 19 Termografia Nicchia_2
- 20 Termografia Nicchia_3
- 21 Termografia Nicchia_4
- 22 Indagine Sonica I18
- 23 Indagine Sonica I19



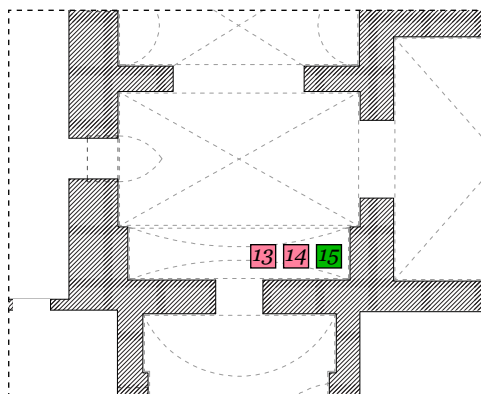
Sala I18

- PTA 9 Termografia I6
- 10 Indagine Sonica I6
- PMS 11 Martinetto Singolo I6
- VAR 12 Verifica Ammorsamento I6



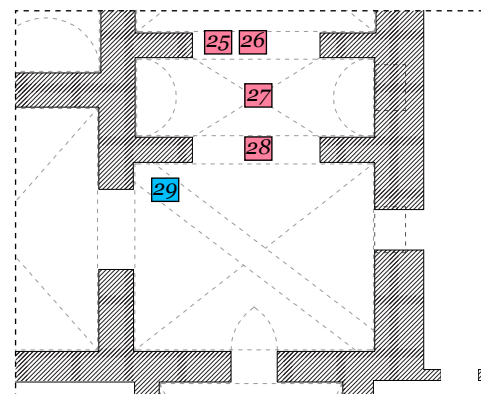
Sala I3

- 24 Indagine Sonica I3



Sala I4

- PTA 13 Termografia I4_1
- 14 Termografia I4_2
- 15 Indagine Sonica I4



Sala I3

- PTA 25 Termografia I11_1
- 26 Termografia I11_2
- 27 Termografia I11_3
- 28 Termografia I11_4
- VSE 29 Endoscopia I12

Sala I10

Si è ritenuto opportuno partire da questa sala dato che corrisponde alla sala oggetto del maggior numero di prove, alcune delle quali sono state un punto di partenza per la realizzazione di indagini nelle altre sale.

Le prime indagini termografiche sono state realizzate in questa sala. Quella relativa allo studio dell'ammorsamento (vedi **Prova 1**) non ha permesso di ottenere esiti significativi: tuttavia è stato possibile osservare la canalina per il passaggio degli impianti, localizzata tra 170 e 185 cm dal piano di calpestio, e alcuni rigonfiamenti e distacchi dell'intonaco nella parete nord. Vista l'impossibilità per cause tecniche di effettuare l'indagine sonica per trasparenza, si è deciso di realizzare alcune riprese dall'altro lato della parete, per precisione dall'angolo nord-est del corridoio perimetrale (vedi **Prove 2-3-4**). In questo caso i risultati sono stati molto interessanti, dato che hanno permesso di visualizzare chiaramente la nuova struttura in cemento armato di sostegno realizzata attraverso i fondi FIO 1986, e anche i relativi blocchi di tamponamento, si presuppone in laterizio o in tufo.

Dal punto di vista delle indagini maggiormente invasive, sono state effettuate due grosse rimozioni di intonaco. Per la rimozione si è utilizzato un trapano demolitore, fino ad arrivare allo strato relativo ai conci di tufo. La prima aveva interessato più o meno un'area 60x90 cmq a circa 130 cm dall'angolo nord-est e a circa 18 cm dal piano di calpestio, ed era finalizzata all'esecuzione delle prove con i martinetti (vedi **Prove 5-6**). I risultati delle prove sono riportati attraverso l'utilizzo di schede che sintetizzano i risultati ottenuti, divisi in sezioni specifiche. Per quanto riguarda i martinetti singoli, troviamo:

- una tabella con la variazione di distanza tra le basi in funzione dello stato di sforzo applicato;
- un grafico che mostra la variazione di lunghezza delle basi di misura in funzione dell'incremento di carico registrato nel primo ciclo e secondo di prova;
- un grafico che permette una più immediata comprensione della variazione di geometria della zona a cavallo del taglio durante l'applicazione del carico con il martinetto;
- una tabella con i valori di ripristino relativi alle singole basi di misura e un valore medio corrispondente allo stato di sforzo locale;

Per quanto riguarda il martinetto doppio, invece, abbiamo portato:

- il diagramma sforzi-deformazioni verticali (ϵ_v) e orizzontali (ϵ_h) relativo alle singole basi di misura ricavato dalla prova con martinetto doppio;
- la curva sforzi-deformazioni verticali medie dei 4 trasduttori 1, 2, 3, 4 e orizzontali della base 5.
- una tabella con i valori del modulo elastico ($\Delta\sigma/\Delta\epsilon_v$) e del coefficiente di dilatazione trasversale ($\Delta\epsilon_h/\Delta\epsilon_v$), calcolati per diversi intervalli di sforzo come interpolazione lineare dei valori sulla curva d'involuppo dei cicli di carico relativa sia ai singoli trasduttori di spostamento che alla media degli strumenti n. 1, 2, 3, 4.

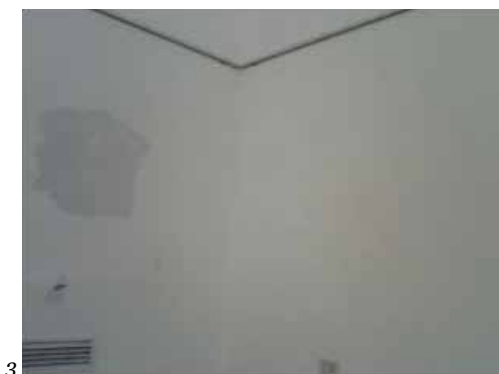
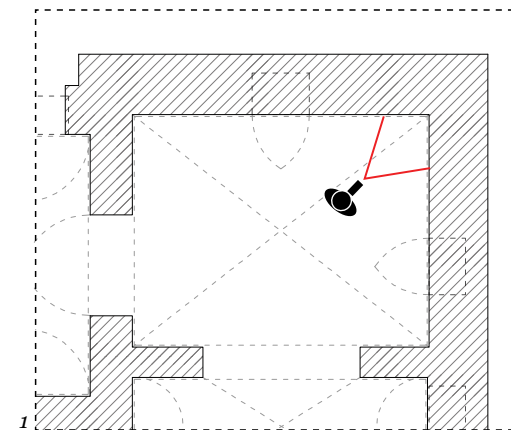
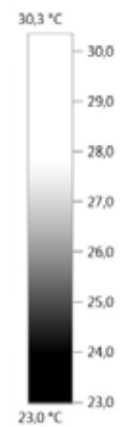
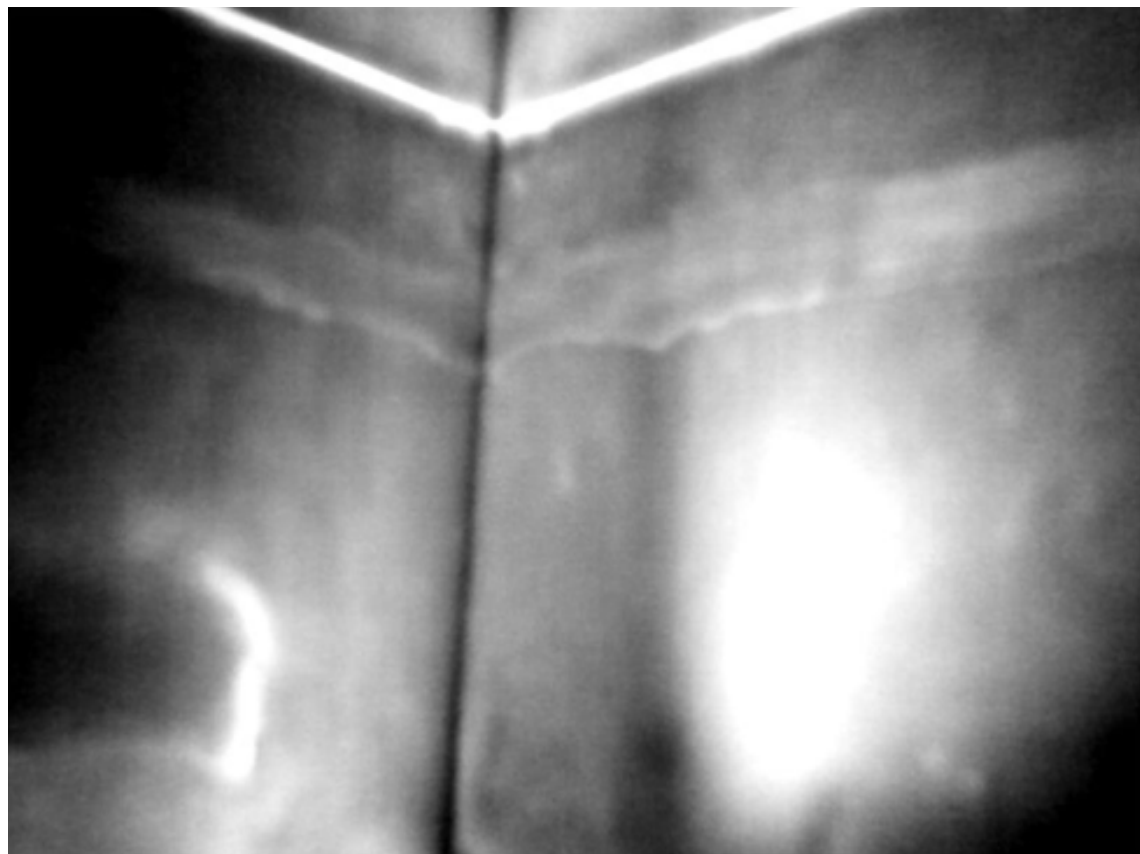
La seconda rimozione dell'intonaco invece era distribuita in due strisce verticali di spessore pari a circa 25 cm e altezza 65/70 cm nell'angolo nord-est della sala. Questa era finalizzata alla visione diretta degli ammorsamenti (vedi **Prova 7**), visto che, come esposto in precedenza, l'analisi termografica non aveva dato risultati soddisfacenti. Dopo la fase di rimozione principale, per mettere ulteriormente in evidenza la tessitura muraria, si è proceduto con una rimozione dello strato di intonaco rimasto sulla superficie attraverso l'utilizzo di uno scalpello, avendo cura di non danneggiare la muratura. La stessa operazione è stata ripetuta anche per la porzione rimossa sulla parete est. In questo modo innanzitutto si è potuto rendere ben visibile il corretto ammorsamento, con i conci che ci incrociano perfettamente a corsi alterni; quindi è stato possibile ottenere delle riproduzioni con schizzi a mano e fotografiche, successivamente elaborate in formato DWG, della tessitura muraria e dei singoli conci con una definizione piuttosto alta.

Decisamente meno invasive sono state le indagini con endoscopio della volta (vedi **Prova 8**). Vista l'impossibilità di eseguire le diverse endoscopie inizialmente previste, si è deciso di esaminare la volta di questa sala, dato che è stata ritenuta affidabile come rappresentazione di tutte le altre strutture voltate del piano. Infatti queste sembrano presentare tutte, fatta eccezione per le variazioni già messe in evidenza nel paragrafo relativo al rilievo geometrico, le medesime caratteristiche costruttive.

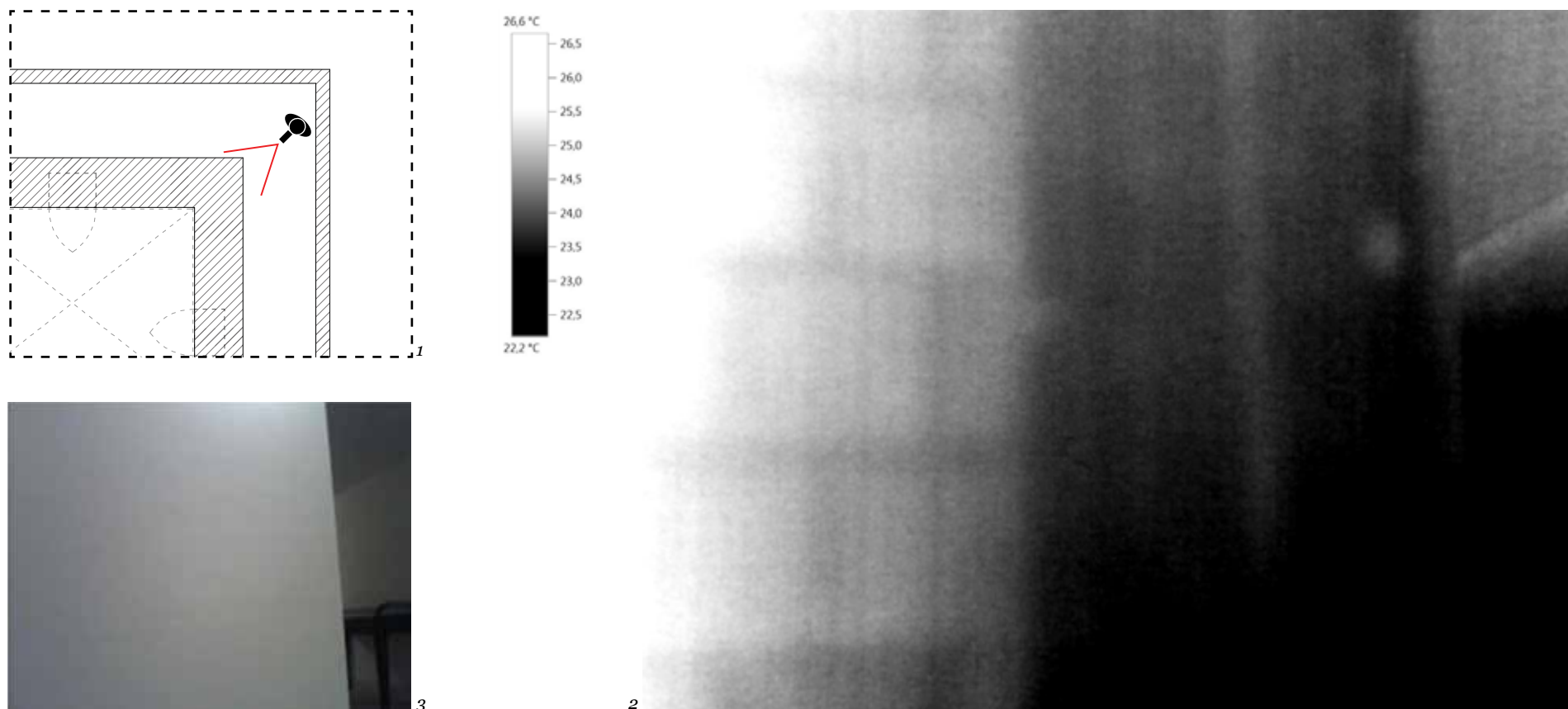
Alcuni problemi ha causato la definizione della profondità del foro: grande preoccupazione suscitava infatti la perforazione in corrispondenza della chiave, vista la presenza al piano superiore della Sala delle feste e della relativa pavimentazione in marmo. Non essendo completamente affidabili i rilievi

dello spessore del solaio in nostro possesso al tempo delle indagini, è stato necessario condurre uno studio di stima dello stesso. Si è scelto di approfittare della presenza delle bocche di lupo, posizionate tutte allo stesso livello (fatta eccezione per quelle relative ai depositi), per effettuare un rilievo veloce, abbastanza approssimativo, ma affidabile: questo era basato su un confronto tra l'altezza delle sale al piano seminterrato, l'altezza delle stesse fino alla bocca di lupo, e la distanza presente tra la bocca di lupo e il piano di calpestio del piano rialzato, rappresentato, all'esterno dell'edificio, dalle lastre in marmo alla base delle finestre. In questo modo, è stato ottenuto uno spessore stimato del solaio in corrispondenza della chiave di volta di circa 50 cm. Si è così deciso di tenere un margine di sicurezza di 10 cm e di eseguire tutti i fori con una profondità massima standard di 40 cm.

Bisogna dire che in realtà i risultati dell'endoscopia in sé non siano stati esaltanti: le ridotte dimensioni del foro, infatti, impedivano una qualsiasi osservazione sulla natura dei materiali incontrati. Era possibile solo osservare dei cambiamenti riguardo alla consistenza degli stessi, che indicavano il passaggio da un elemento all'altro. Per fortuna è stato possibile raccogliere il materiale che fuoriusciva durante l'esecuzione dei fori, è realizzare così una forma approssimativa di carotaggio a seconda del colore e delle caratteristiche morfologiche. In questo modo è stato possibile ottenere una stratigrafia parziale: si intuisce la presenza di una doppia fila di conci di tufo ai reni, con uno spessore del concio singolo di circa 20 cm; sembra che lo spessore della volta vada a ridursi progressivamente verso la chiave, dove abbiamo una fila dello stesso spessore, sempre cioè di 20 cm, quindi un'altra fila di spessore inferiore, circa 8 cm, che lascia il posto poi a materiale vario apparentemente utilizzato come sottofondo del pavimento sovrastante.



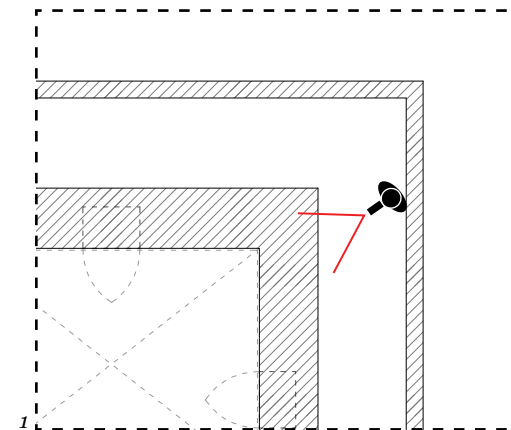
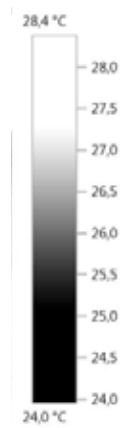
4.14. Termografia I10: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Si può osservare la canalina per il passaggio degli impianti nella parte superiore.



4.15. Termografia Corr_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Si legge chiaramente una parte più scura, perciò più fredda, indicante la presenza della struttura in cemento armato; inoltre è perfettamente visibile la tessitura muraria dei blocchi di tamponamento.



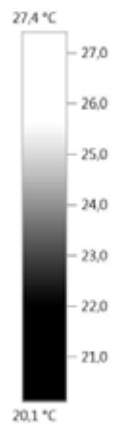
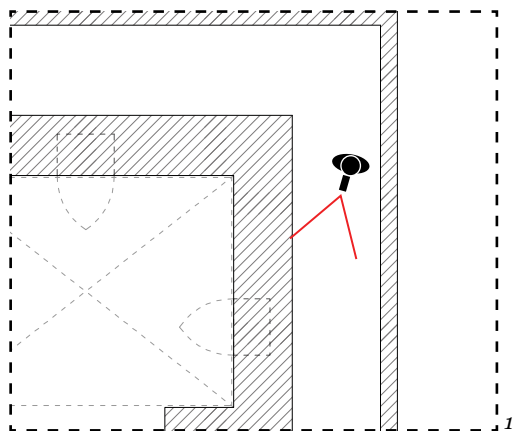
2



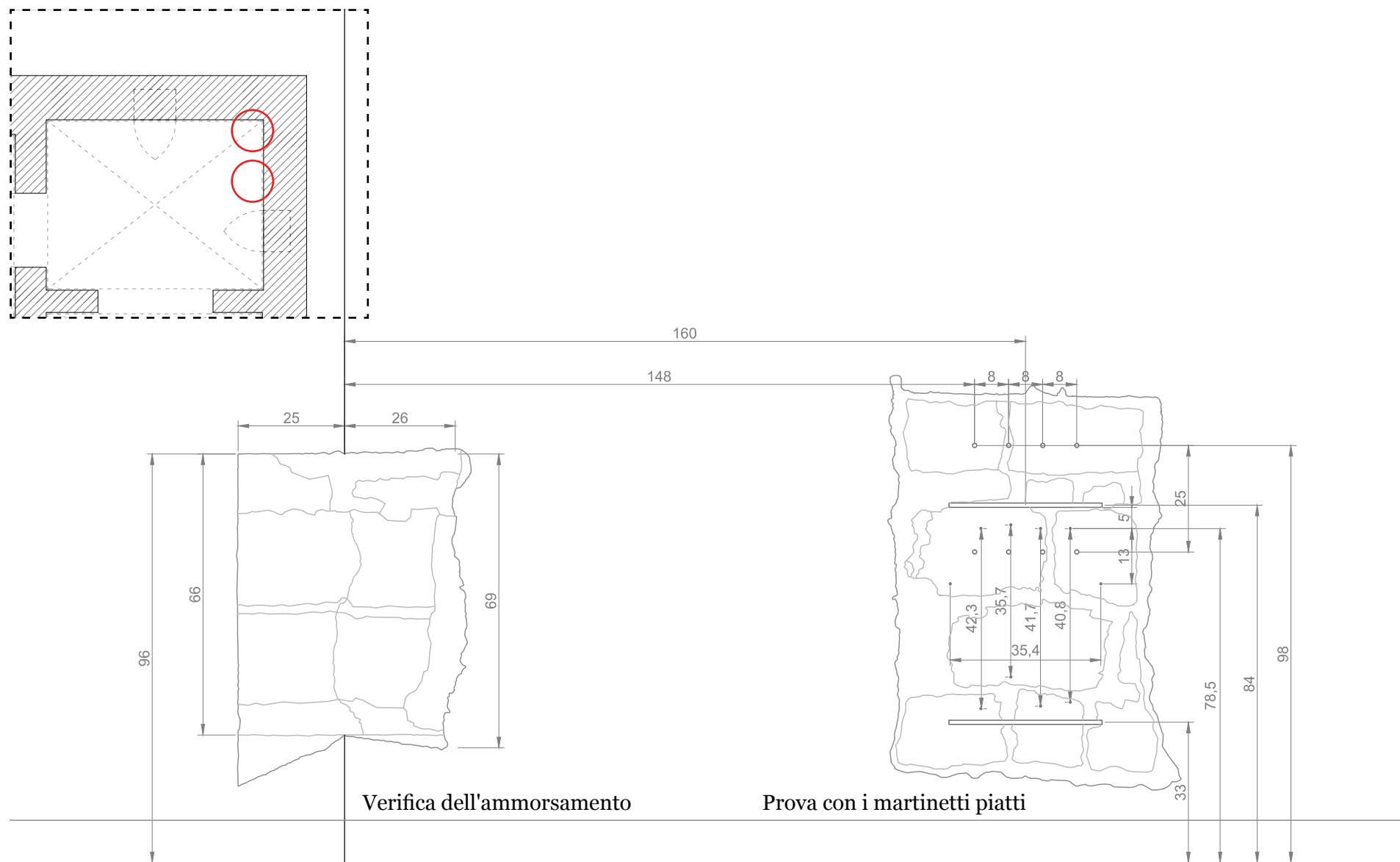
3



4.16. Termografia Corr_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Si può osservare ancora meglio la tessitura dei blocchi.



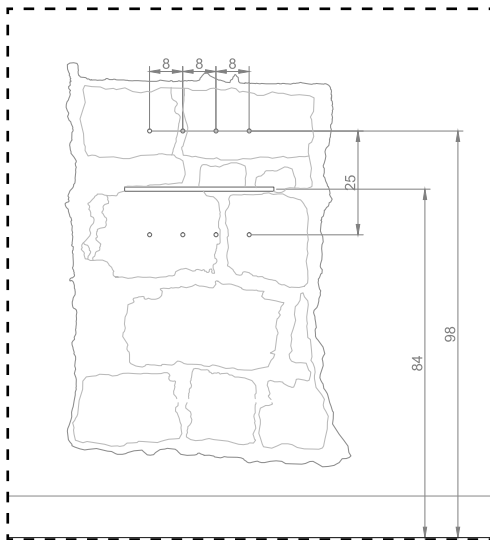
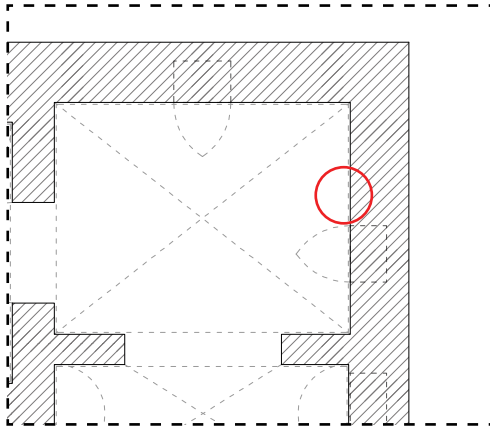
- 4.17. Termografia Corr_3: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Una panoramica molto interessante di tutta la parete est realizzata con il FIO 86, che permette di valutare l'interasse tra i pilastri in cemento armato.



4.18. Rielaborazione grafica quotata delle rimozioni di intonaco relative alla verifica dell'ammorsamento e alla prova con i martinetti nella sala I10; è visibile il posizionamento dei tagli e dei trasduttori di spostamento



4.19. Fotostoria delle diverse fasi dell'indagine con martinetti nella sala I10: rimozione dell'intonaco con trapano demolitore (1), inserimento del martinetto singolo nel taglio (2), rilievo della variazione di distanza tra le basi (3), panoramica delle apparecchiature utilizzate e preparazione alla prova con martinetti doppi (4), fasi di esecuzione della prova con aumento (5) e scarico (6) della pressione esercitata dai martinetti.

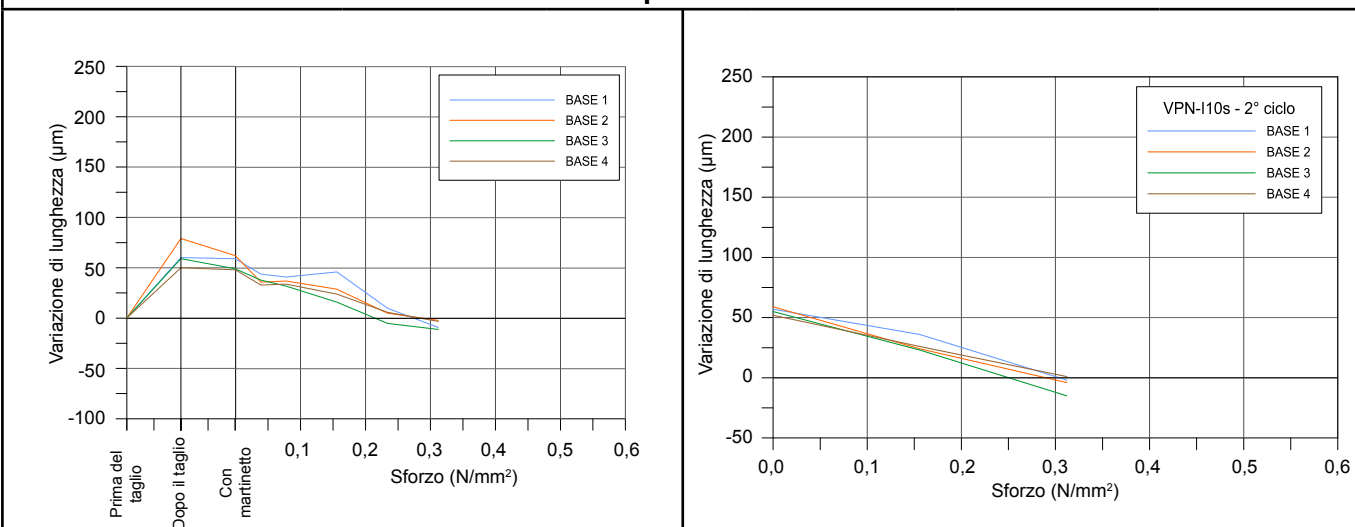


4.20. Martinetto singolo I10, prima scheda: a sinistra localizzazione della prova e posizionamento delle basi di misura e del taglio; a destra la tabella con la variazione di distanza tra le basi in funzione dello stato di sforzo applicato durante le diverse fasi di prova e una sintesi delle caratteristiche principali del martinetto piatto utilizzato.

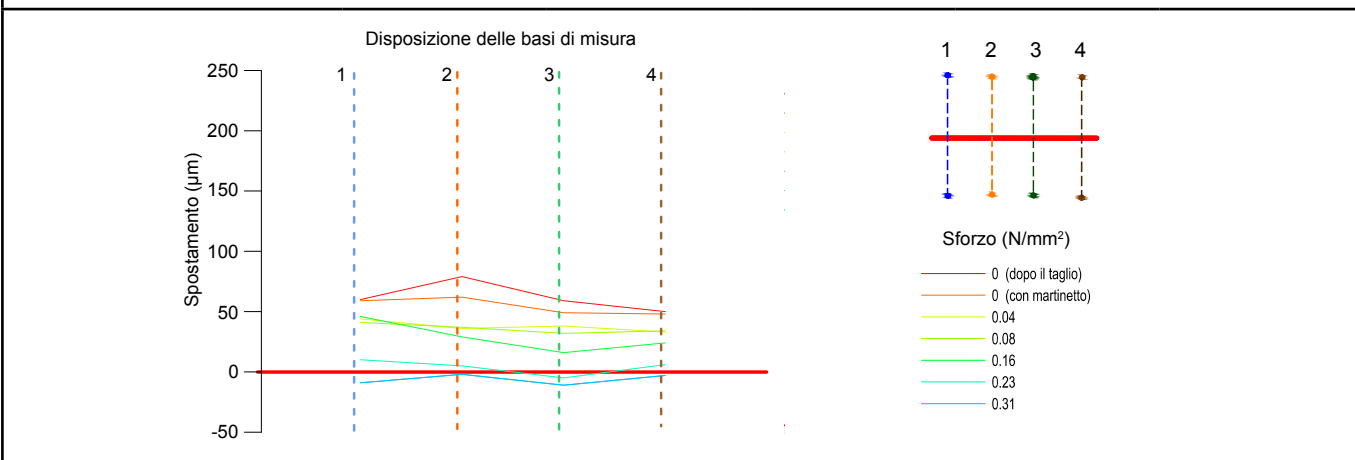
Variazione di distanza tra le basi in funzione dello stato di sforzo applicato						
Fase di prova	Sforzo (N/mm ²)	Variazione di distanza tra le basi di misura (micron)				Tempo (h:m)
		Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	
Prima del taglio		0	0	0	0	11:55
Dopo il taglio	0,00	60	79	59	50	
Con martinetto	0,00	59	62	49	48	
Carico	0,04	44	36	38	33	
	0,08	41	37	32	34	
	0,16	46	29	16	24	
Ripristino apertura taglio	0,23	10	5	-5	6	
	0,31	-9	-2	-11	-3	
Scarico	0,16	26	27	19	24	
	0,00	50	58	51	45	
	0,00	57	59	55	52	
Ripetizione prova	0,16	36	24	23	26	
	0,31	-2	-4	-15	1	
	0,16	27	17	20	24	
	0,00	57	58	56	51	

Caratteristiche della strumentazione utilizzata	
Tipo di martinetto:	<i>semicircolare</i>
Dimensioni:	350 x 260 x 4 mm
Costante di taratura media del martinetto:	$K_m = 0.86$
Costante adimensionale:	$K_a = A_m/A_t = 0.91$

Variazione di lunghezza delle basi di misura in funzione dello sforzo applicato nel 1° e 2° ciclo di prova



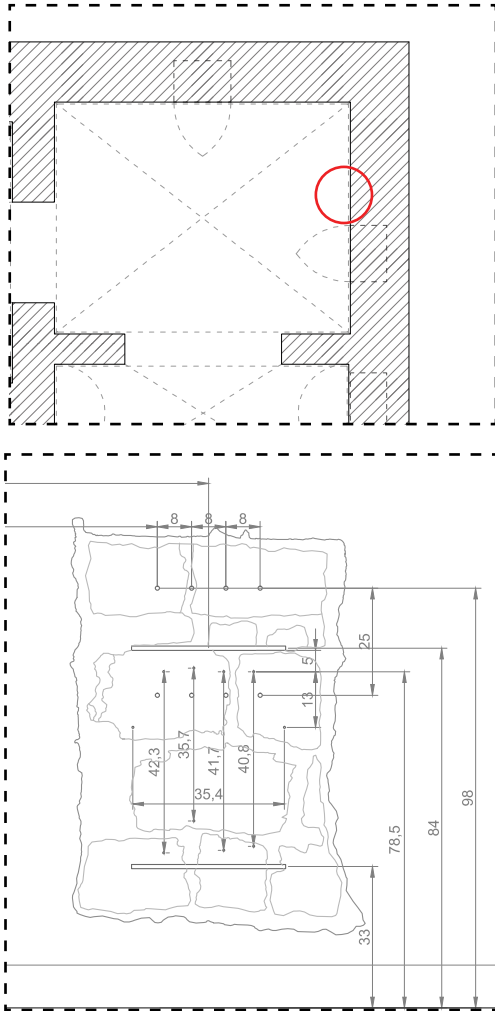
Variazione di geometria della zona a cavallo del taglio durante l'applicazione del carico



Stato di sforzo locale (N/mm²)

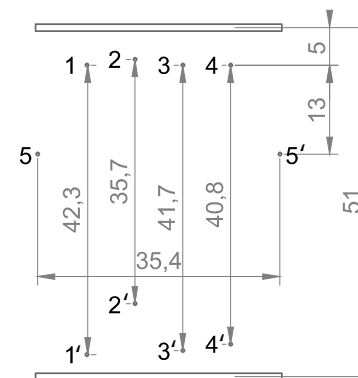
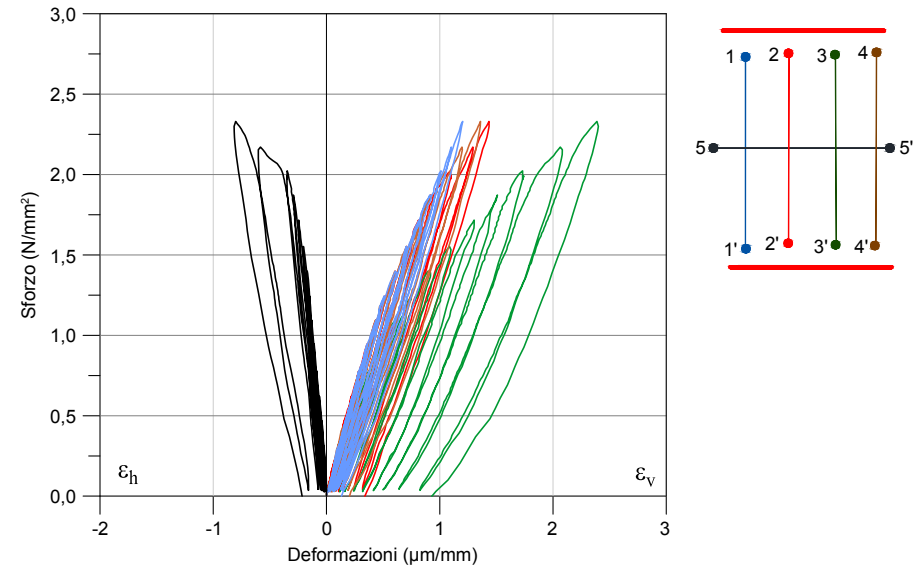
Fase di prova	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Media
Primo ciclo	0,27	0,29	0,21	0,28	0,26
Secondo ciclo	0,30	0,29	0,25	0,32	0,29

4.21. *Martinetto singolo I10, seconda scheda: in alto rappresentazioni grafiche delle variazioni di lunghezza delle basi nei due differenti cicli di prova; al centro rappresentazione più immediata delle deformazioni subite dalla zona del taglio durante le prove; in basso la tabella con i valori di ripristino relativi alle singole basi di misura e il valore medio corrispondente allo stato di sforzo locale.*



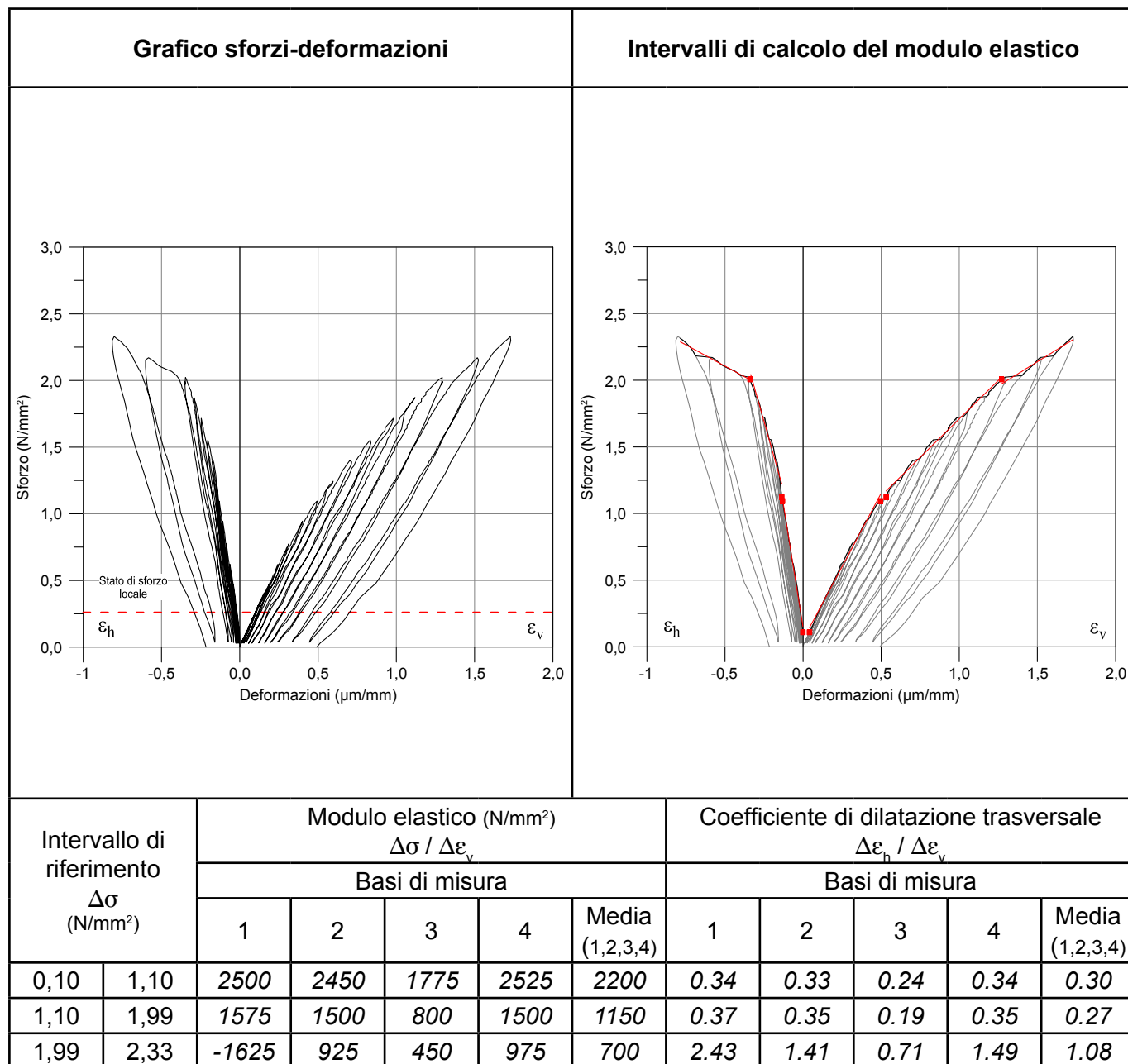
4.22. Martinetto doppio I10, prima scheda: a sinistra localizzazione della prova e rappresentazione della porzione di muratura oggetto dell'indagine; a destra il diagramma sforzi-deformazioni verticali (ϵ_v) e orizzontali (ϵ_h) relativo alle singole basi di misura elaborato durante la prova e le misure relative al posizionamento dei trasduttori e dei tagli.

Variazione di distanza tra le basi in funzione dello stato di sforzo applicato

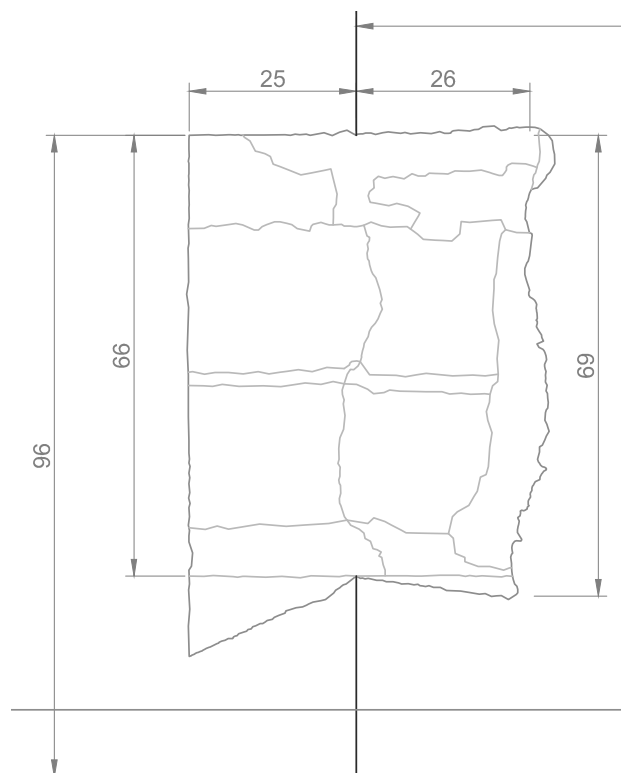
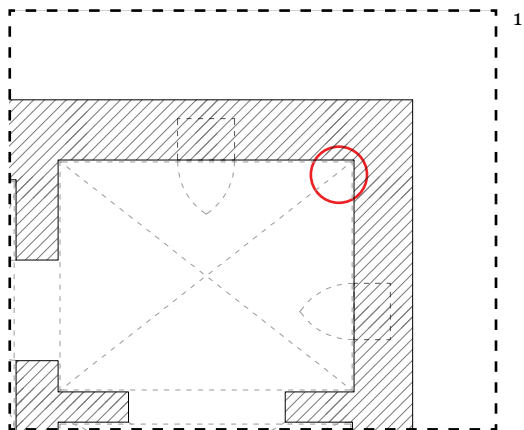


Misure principali

Distanza tra i martinetti:
510 mm
Distanze tra i trasduttori
1-1': 423 mm
2-2': 357 mm
3-3': 417 mm
4-4': 408 mm
5-5': 354 mm



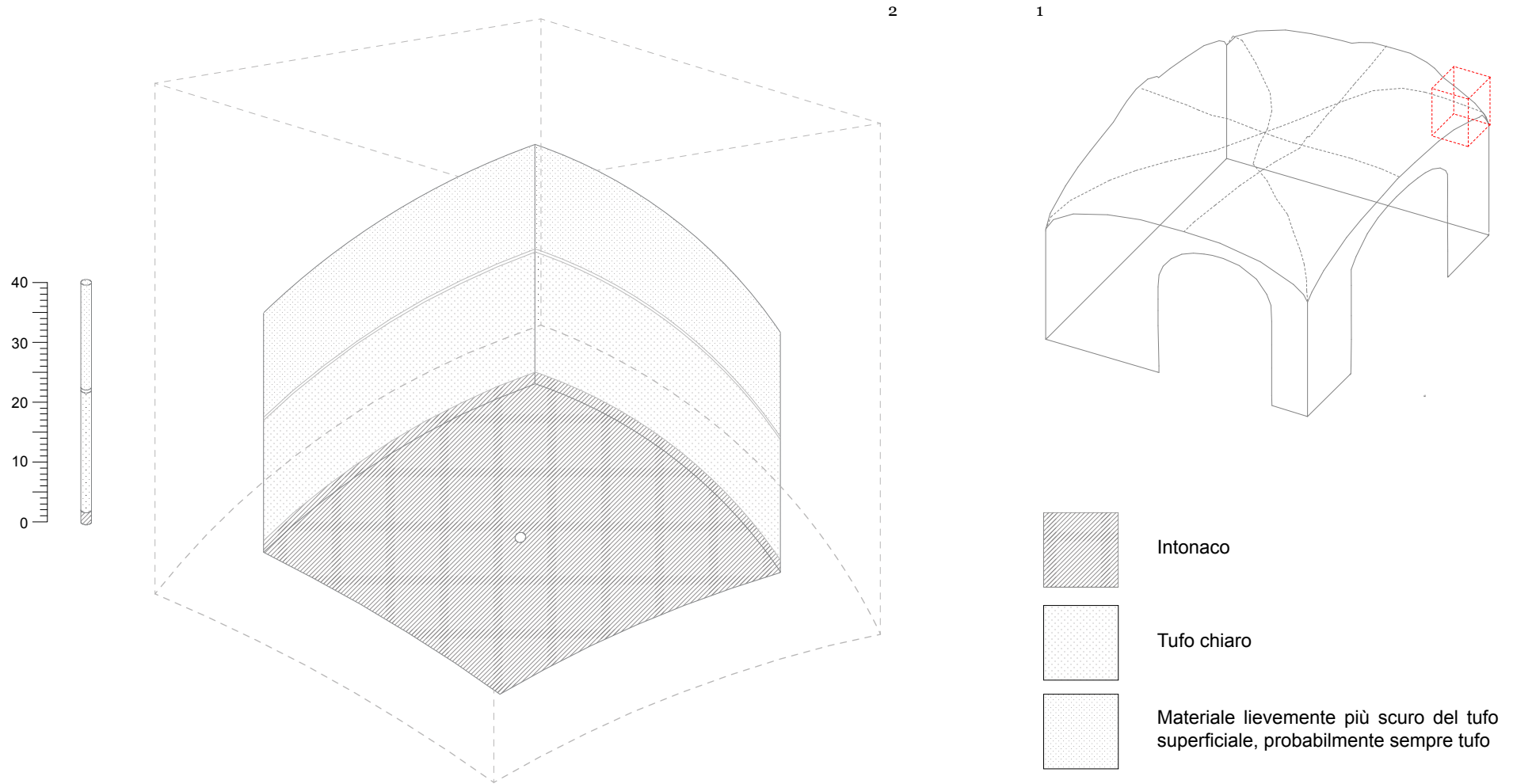
4.23. *Martinetto doppio I10, seconda scheda: in alto a sinistra la curva sforzi-deformazioni verticali medie dei trasduttori 1-1', 2-2', 3-3' e 4-4', e orizzontali della base 5-5'; in alto a destra gli intervalli di calcolo del modulo elastico utilizzati per l'elaborazione della tabella (in basso) con i valori del suddetto modulo e con i coefficienti di dilatazione trasversale, calcolati sia per i singoli trasduttori che per la loro media.*



4.24. Verifica Ammortamento I10: localizzazione (1), immagine reale (2), elaborazione grafica (3), schizzo di cantiere (4). Si può notare la perfetta corrispondenza tra i corsi di blocchi di tufo e l'altrettanto corretto incastro.

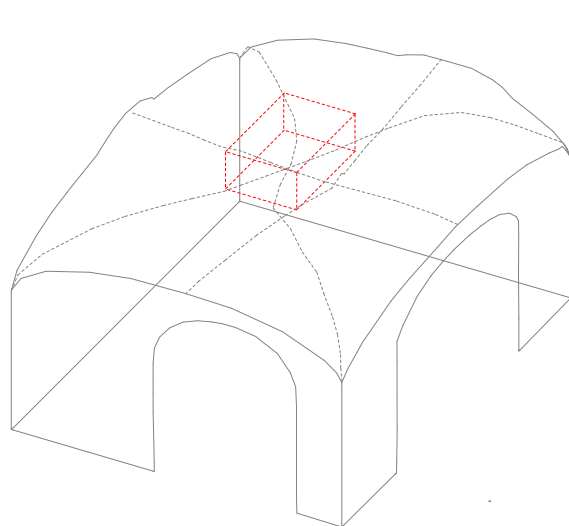


4.25. Fotostoria del rilievo dello spessore del solaio dalla sala I9 e delle diverse fasi dell'indagine con endoscopio nella sala I10: rilievo dello spessore del solaio, con misurazione dell'altezza dal livello di calpestio del seminterrato alla bocca di lupo (1) e successiva distanza dalla bocca di lupo al livello di calpestio del piano rialzato (2); quindi montaggio del ponteggio (3), ispezione con endoscopio del foro all'imposta della volta (4), esecuzione del foro in chiave (5), materiale raccolto all'imposta (6), con le due diverse colorazioni di tufo, e in chiave (7), con i due diversi tufi e il sottofondo del pavimento sulla destra.



4.26. *Endoscopia I10 (Renì): localizzazione e rappresentazioni grafiche dei risultati della prova alle reni (1,2), con una simulazione di carotaggio e la ricostruzione di una porzione di struttura secondo i dati raccolti (la porzione riguarda soltanto i 40 centimetri dall'intradosso inferiore analizzati).*

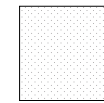
4.27. *(a fronte) Endoscopia I10 (Chiave): localizzazione e rappresentazioni grafiche dei risultati della prova in chiave (3,4), con una simulazione di carotaggio e la ricostruzione di una porzione di struttura secondo i dati raccolti (la porzione riguarda soltanto i 40 centimetri dall'intradosso inferiore analizzati).*



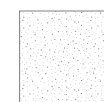
Intonaco



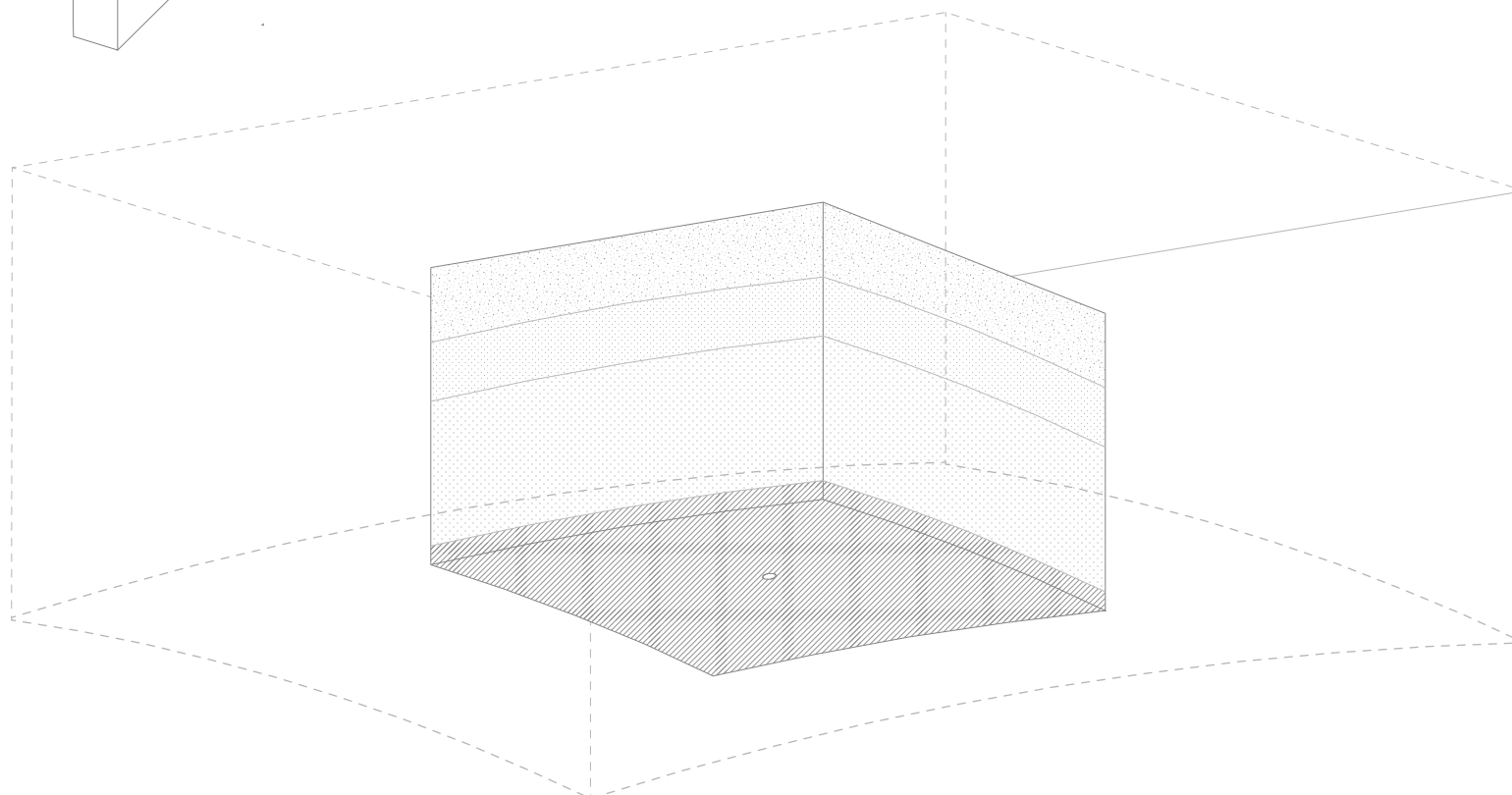
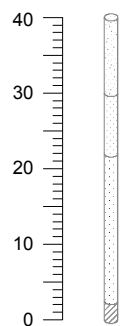
Tufo chiaro



Materiale lievemente più scuro del tufo superficiale, probabilmente sempre tufo



Sottofondo del pavimento in sabbia e leganti



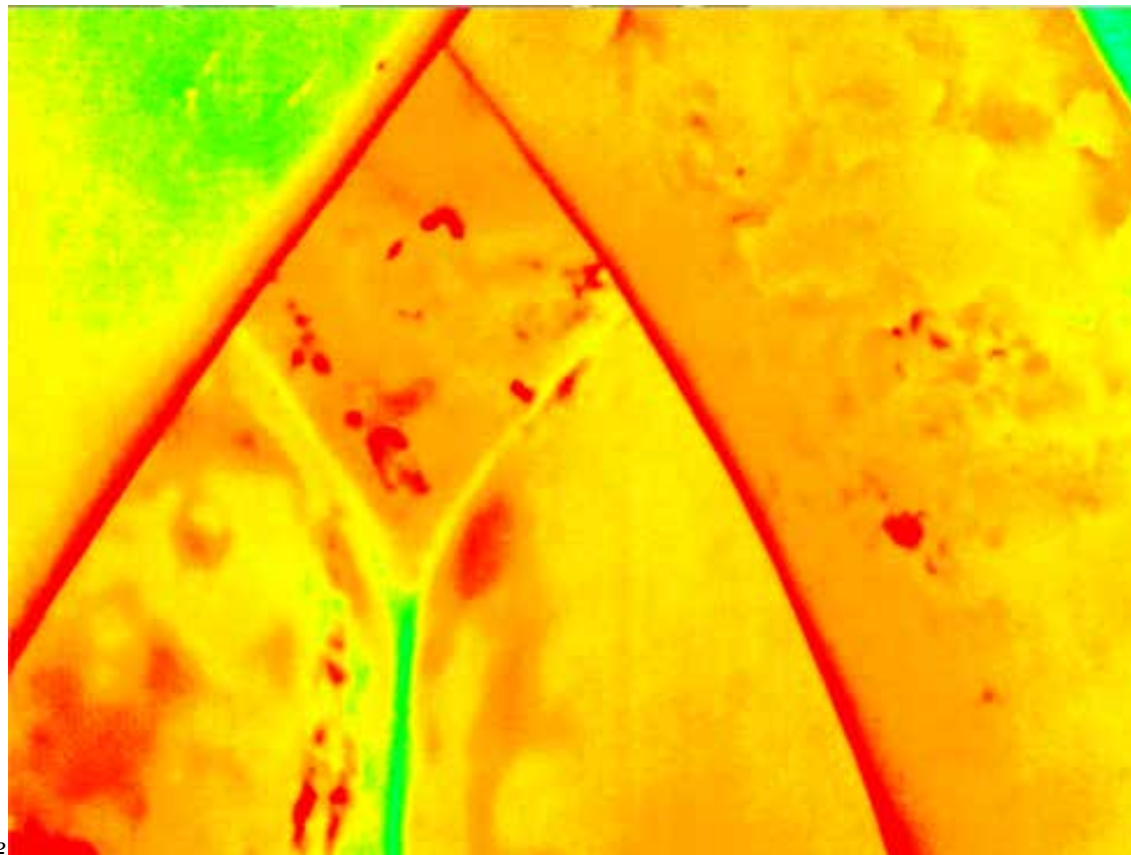
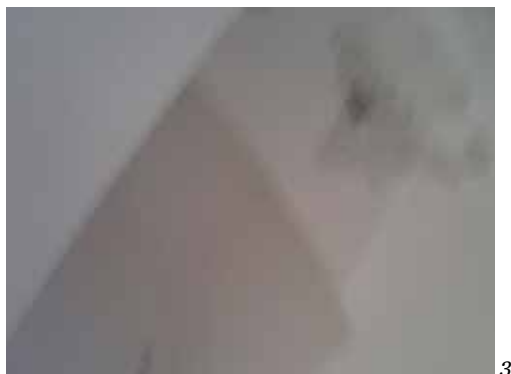
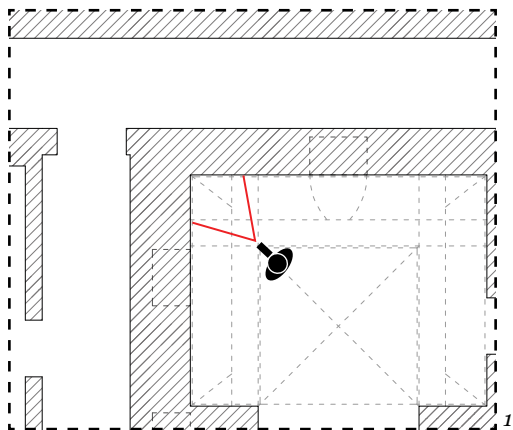
Sala I6

In questa sala inizialmente, secondo l'ultimo progetto, erano previste solo delle indagini termografiche dell'angolo nord-ovest finalizzate allo studio dell'ammorsamento murario. Tuttavia in situ si era deciso di estendere le prove anche alla volta superiore, scattando più di trenta istantanee in modo da cercare di carpire le caratteristiche del particolare intreccio di archi e volte che caratterizza questa sala. Purtroppo, a causa di un malfunzionamento della termocamera, tutto questo materiale è andato perduto, ad esclusione di una ripresa effettuata in corrispondenza dell'imposta della volta. In ogni caso, al momento stesso della ripresa, non si erano notati risultati degni di nota, soprattutto per quanto riguarda l'ammorsamento.

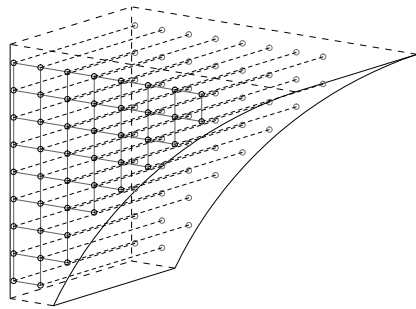
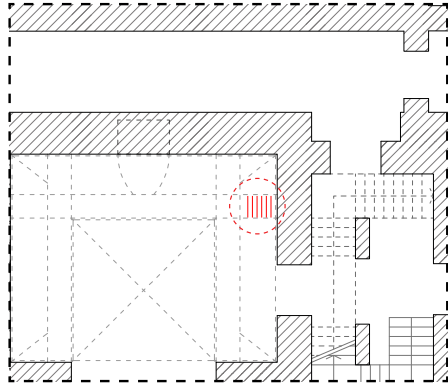
Si era così deciso di effettuare un'ulteriore prova sonica in trasparenza, inizialmente non prevista, in corrispondenza delle reni presso la parete est del grande arco longitudinale, in modo avere informazioni sulla morfologia quantomeno di questo arco. Naturalmente l'usuale griglia 75x75 cm in questo caso non si rivelava adatta, e si deviò per un'alternativa che coprisse quanta più superficie dell'arco possibile e che non rendesse necessario il montaggio di un impalcato.

Come nella sala vista precedentemente, sono state necessarie due massicce rimozioni di intonaco. La prima, in corrispondenza della base dell'arco longitudinale nella parete ovest, era di una dimensione approssimativa di 83x52 cm, a circa 125 cm dall'angolo nord-ovest e a 23 cm dalla linea di calpestio. L'intervento era finalizzato all'esecuzione della prova con martinetti piatti, rallentata in principio dall'alto tasso di umidità presente sulla superficie liberata. Si è reso così necessario riscaldare l'area interessata attraverso l'utilizzo di una stufa alogena per alcuni minuti. I risultati della successiva prova con martinetto singolo sono riportati con le stesse modalità esposte in precedenza.

La seconda rimozione di intonaco è stata realizzata in maniera abbastanza veloce e su una porzione di parete leggermente inferiore alle precedenti, vista la diffusa presenza di condotte per il passaggio degli impianti. Si sono rimosse due fasce di larghezza attorno ai 20 cm e di altezza pari a circa 64 cm esattamente sull'angolo nord-ovest della sala. In realtà, le ridotte dimensioni si sono rivelate completamente sufficienti a confermare il tipo di ammorsamento già osservato in maniera molto più chiara nella sala I10.



4.28. Termografia I6: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Da queste termografia non è stato possibile raccogliere alcun informazione degna di nota.

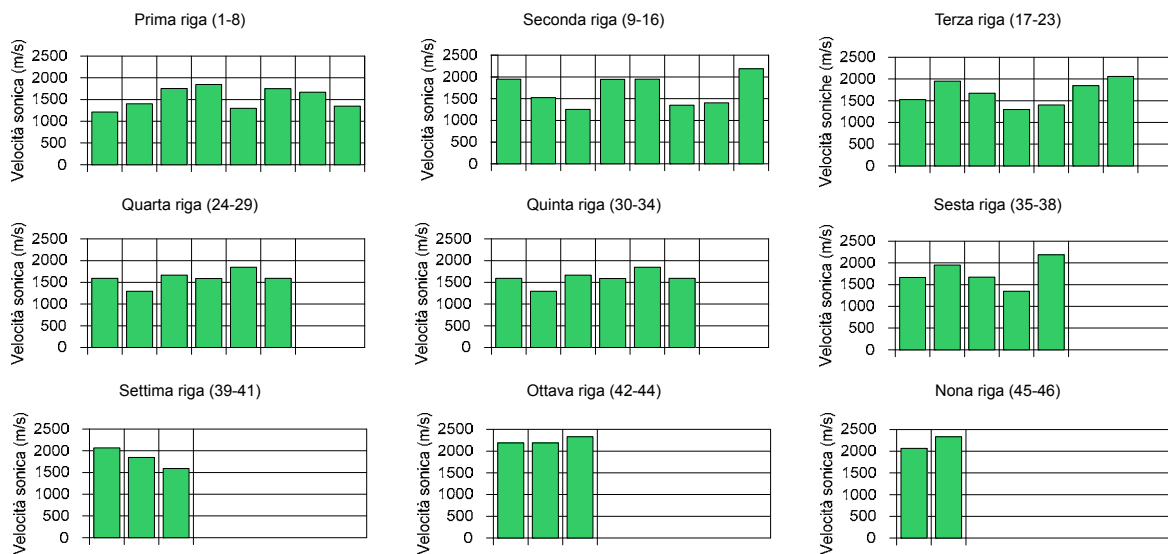
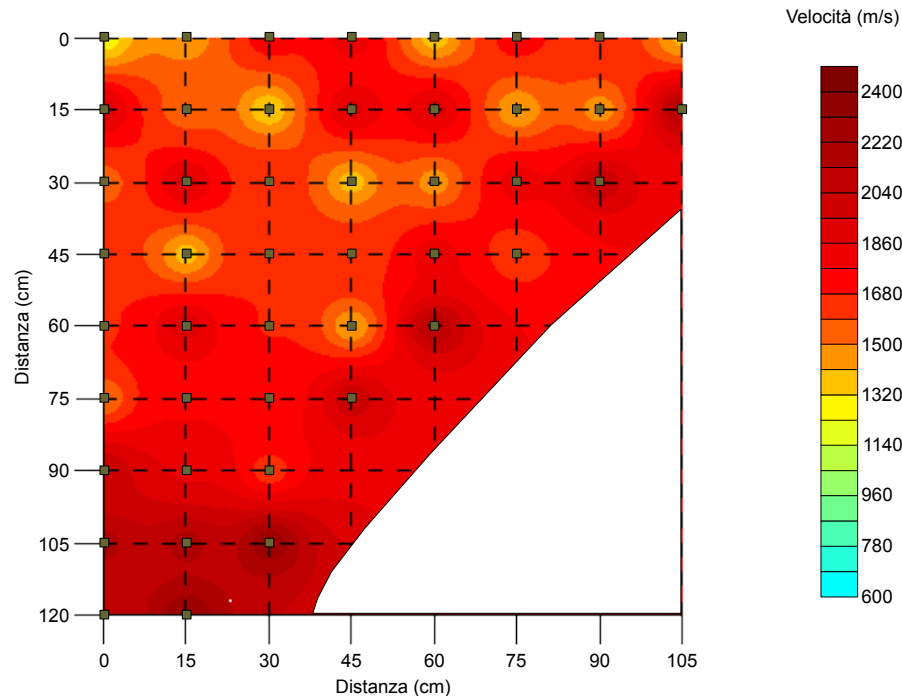
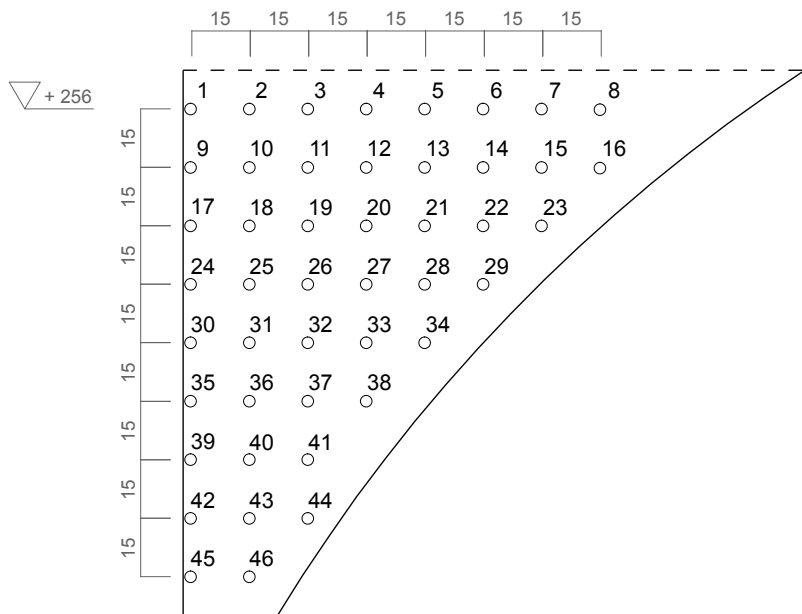


Velocità minima (m/s)	
punto 1	1211
Velocità massima (m/s)	
punto 46	2333
Velocità media (m/s)	
1730	
Deviazione standard (m/s)	
312	

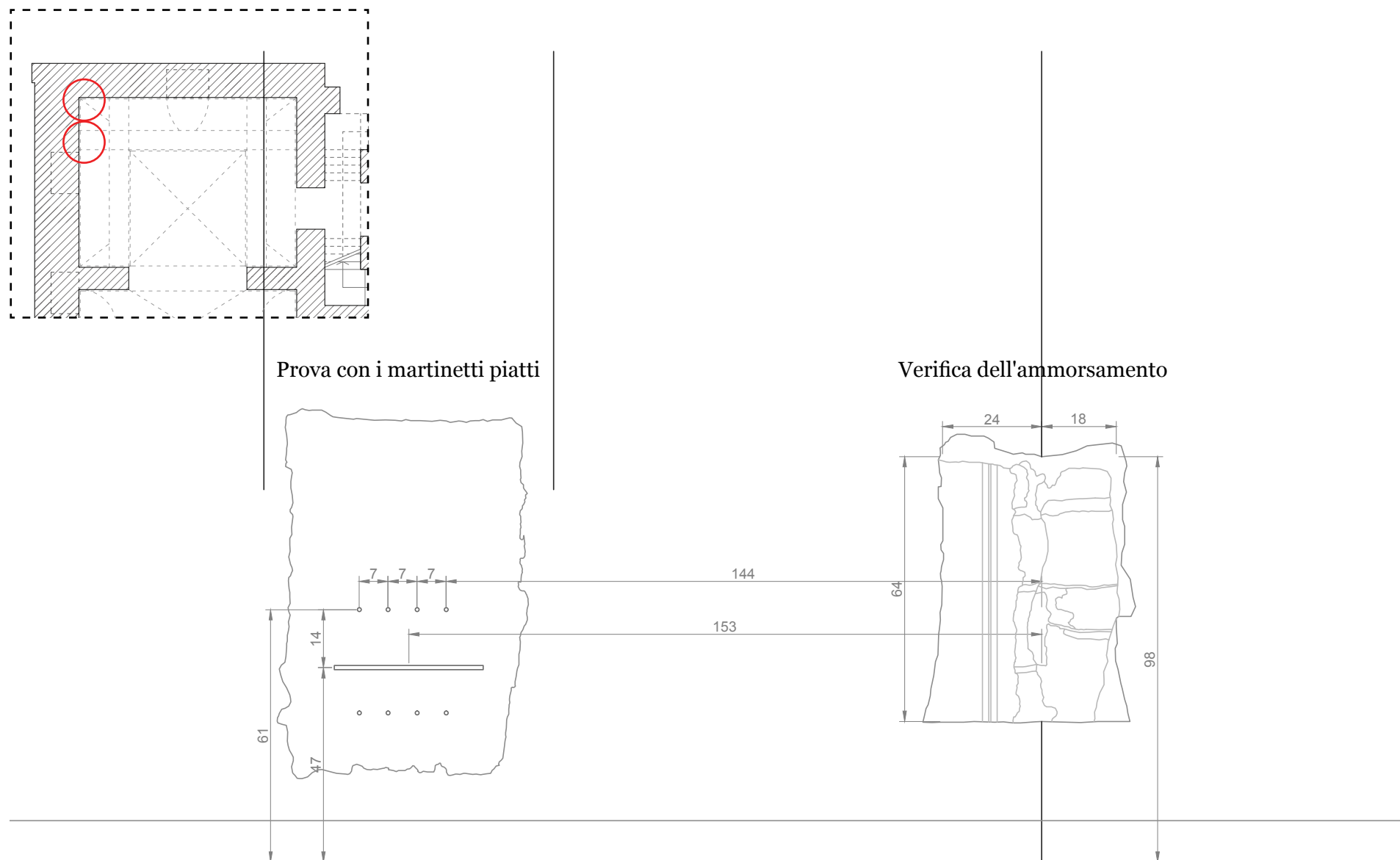
Punto di prova	Tempo (μ s)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
1	578	0.70	1211
2	499	0.70	1403
3	399	0.70	1754
4	379	0.70	1847
5	539	0.70	1299
6	400	0.70	1750
7	420	0.70	1667
8	519	0.70	1349
9	359	0.70	1950
10	459	0.70	1525
11	558	0.70	1254
12	360	0.70	1944
13	359	0.70	1950
14	519	0.70	1349
15	498	0.70	1406
16	320	0.70	2188
17	459	0.70	1525
18	359	0.70	1950
19	419	0.70	1671
20	540	0.70	1296
21	499	0.70	1403
22	379	0.70	1847
23	340	0.70	2059

Punto di prova	Tempo (μ s)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
24	439	0.70	1595
25	540	0.70	1296
26	420	0.70	1667
27	440	0.70	1591
28	379	0.70	1847
29	439	0.70	1595
30	420	0.70	1667
31	359	0.70	1950
32	419	0.70	1671
33	520	0.70	1346
34	320	0.70	2188
35	479	0.70	1461
36	399	0.70	1754
37	419	0.70	1671
38	340	0.70	2059
39	339	0.70	2065
40	379	0.70	1847
41	440	0.70	1591
42	320	0.70	2188
43	320	0.70	2188
44	300	0.70	2333
45	339	0.70	2065
46	300	0.70	2333

4.29. Indagine sonora I6, prima scheda: a sinistra in alto la localizzazione della prova e una ricostruzione tridimensionale della porzione di struttura oggetto della prova; a destra la tabella con le velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto; a sinistra in basso una tabellina con le statistiche principali.



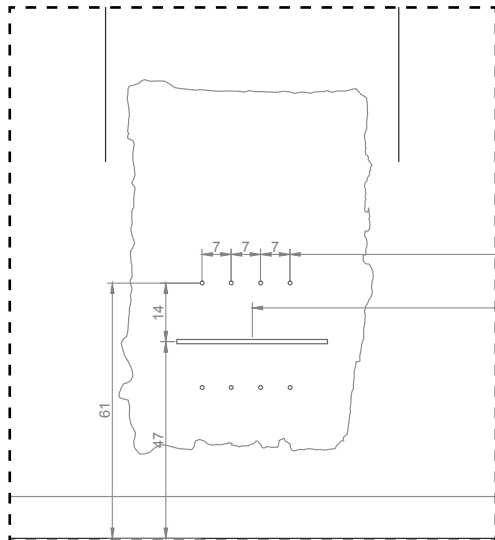
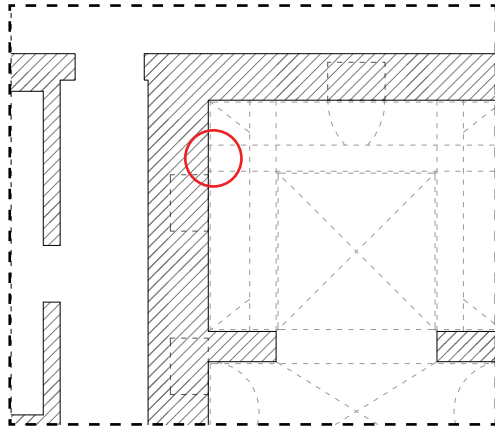
4.30. Indagine sonica 16, seconda scheda: in alto la griglia di punti utilizzata, quotata in centimetri e la rappresentazione grafica dei risultati di prova secondo la velocità di propagazione delle onde elastiche; in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni riga e una ricostruzione tridimensionale della porzione di struttura oggetto della prova.



4.31. Rielaborazione grafica quotata delle rimozioni di intonaco relative alla verifica dell'ammorsamento e alla prova con i martinetti nella sala I6; è visibile il posizionamento dei tagli e delle basi di misura



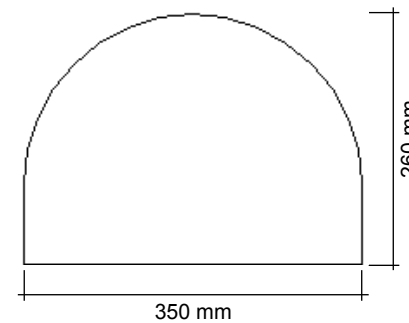
4.32. Fotostoria delle diverse fasi dell'indagine con martinetti nella sala I6: rimozione dell'intonaco con trapano demolitore (1), rimozione degli strati più vicini alla muratura con scalpello (2), riscaldamento della muratura (3), posizionamento delle basi di misura (4), rilievo della distanza tra le basi di misura tramite deformometro (5), porzione di struttura oggetto dell'indagine con martinetto inserito (6), esecuzione della prova con aumento della pressione del martinetto singolo (7).



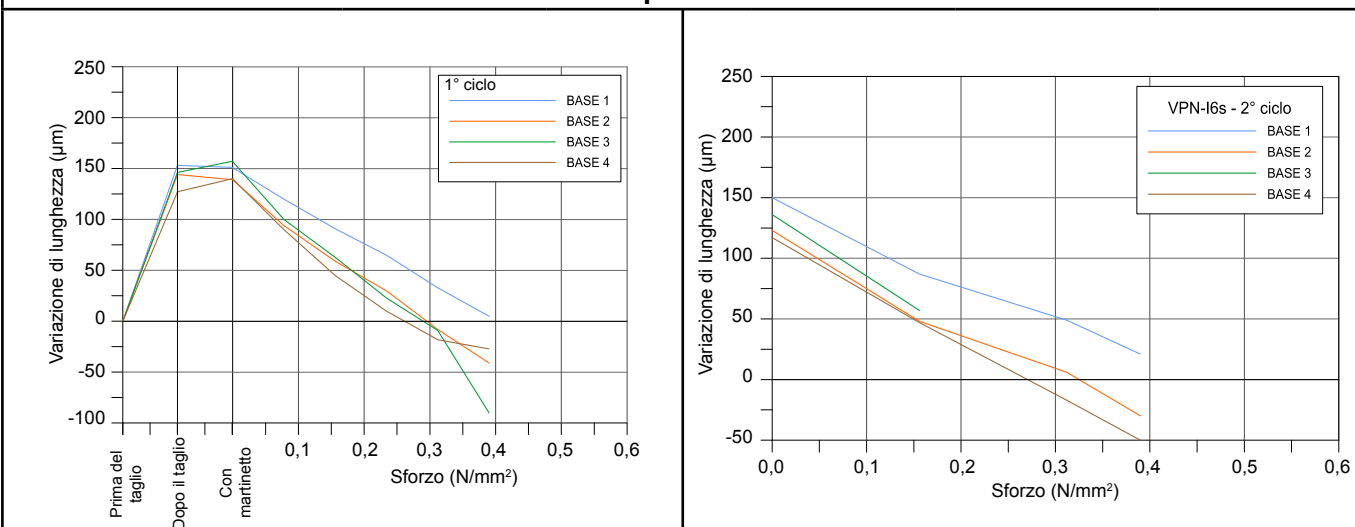
4.33. Martinetto singolo I6, prima scheda: a sinistra localizzazione della prova e posizionamento delle basi di misura e del taglio; a destra la tabella con la variazione di distanza tra le basi in funzione dello stato di sforzo applicato durante le diverse fasi di prova e una sintesi delle caratteristiche principali del martinetto piatto utilizzato.

Variazione di distanza tra le basi in funzione dello stato di sforzo applicato						
Fase di prova	Sforzo (N/mm ²)	Variazione di distanza tra le basi di misura (micron)				Tempo (h:m)
		Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	
Prima del taglio		0	0	0	0	11:15
Dopo il taglio	0,00	153	144	146	127	
Con martinetto	0,00	151	139	157	140	
Carico	0,08	120	94	100	90	11:52
	0,16	91	59	63	45	
Ripristino apertura taglio	0,23	65	30	23	10	
	0,31	33	-8	-9	-18	
	0,39	5	-41	-90	-27	
Scarico	0,16	78	38	41	34	
	0,00	143	122	132	114	
Ripetizione prova	0,00	150	123	136	117	
	0,16	87	48	57	47	
	0,31	49	6		-17	
	0,39	21	-30		-50	
	0,16	82	43		38	
	0,00	143	119		114	12:20

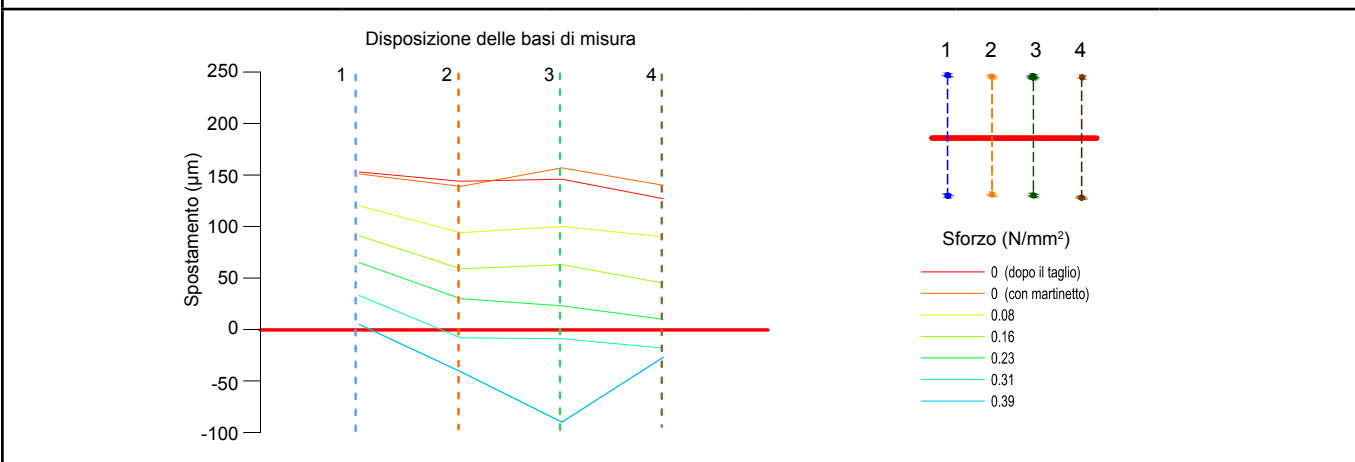
Caratteristiche della strumentazione utilizzata	
Tipo di martinetto:	<i>semicircolare</i>
Dimensioni:	350 x 260x 4 mm
Costante di taratura media del martinetto:	$K_m = 0,86$
Costante adimensionale:	$K_a = A_m/A_t = 0.91$



Variazione di lunghezza delle basi di misura in funzione dello sforzo applicato nel 1° e 2° ciclo di prova



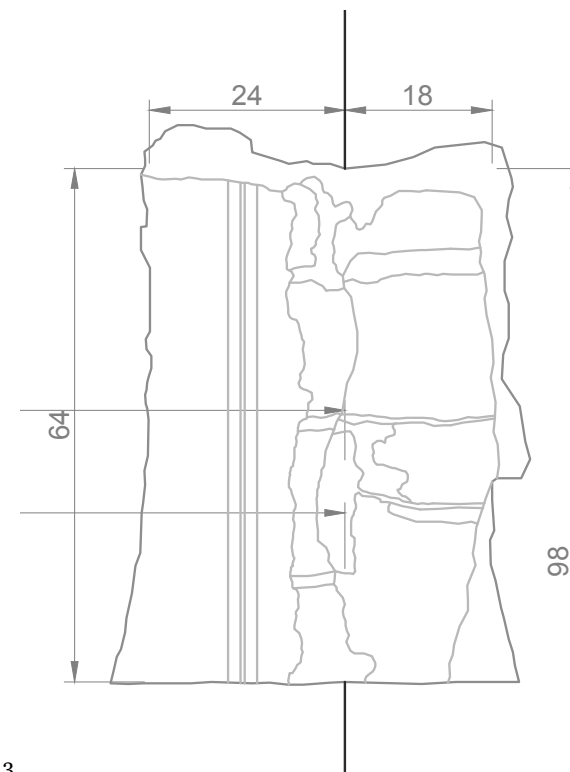
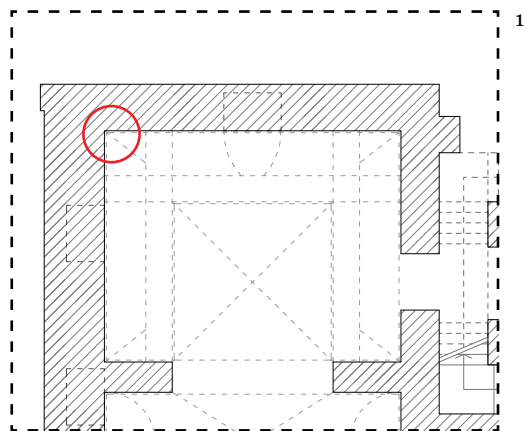
Variazione di geometria della zona a cavallo del taglio durante l'applicazione del carico



Stato di sforzo locale (N/mm²)

Fase di prova	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Media
Primo ciclo	0,40	0,29	0,29	0,26	0,28
Secondo ciclo	0,45	0,32	-	0,27	0,30

4.34. Martinetto singolo I6, seconda scheda: in alto rappresentazioni grafiche delle variazioni di lunghezza delle basi nei due differenti cicli di prova; al centro rappresentazione più immediata delle deformazioni subite dalla zona del taglio durante le prove; in basso la tabella con i valori di ripristino relativi alle singole basi di misura e il valore medio corrispondente allo stato di sforzo locale.



4.35. Verifica Ammorsamento I6: localizzazione (1), immagine reale (2) e elaborazione grafica (3). La situazione è la medesima già riscontrata in precedenza nella sala I10, con un incastro a corsi alterni ben visibile.

Sala I4

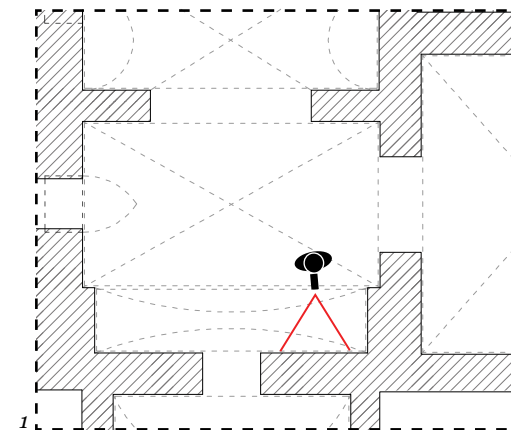
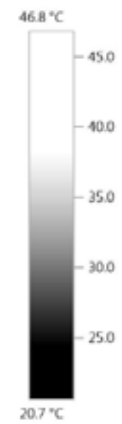
Un minimo approfondimento del maschio murario tra la sala I4 e il deposito occidentale era doveroso, vista la particolare situazione dal punto di vista fessurativo osservabile sulla sua superficie sia al piano rialzato che primo. Si era però dovuti optare solamente verso prove non invasive, probabilmente a causa del materiale di altissimo valore presente nel magazzino. Vista la presenza di impianti dall'altro lato, l'indagine termografica con riscaldamento attivo è stata effettuata dalla parte della sala I4. I risultati tuttavia non si sono rivelati di grandi utilità: è stato possibile solo osservare una fascia più calda di 5 cm a circa 211 cm dal livello di calpestio, probabilmente da riferire al passaggio di qualche impianto; infine, erano leggermente visibili delle tracce che potevano indicare la possibile presenza di conci di altezza 20 cm circa.

Abbiamo perciò proceduto con l'indagine sonica di trasparenza prevista nello stesso punto, costruita sull'usuale griglia 75x75 cmq.

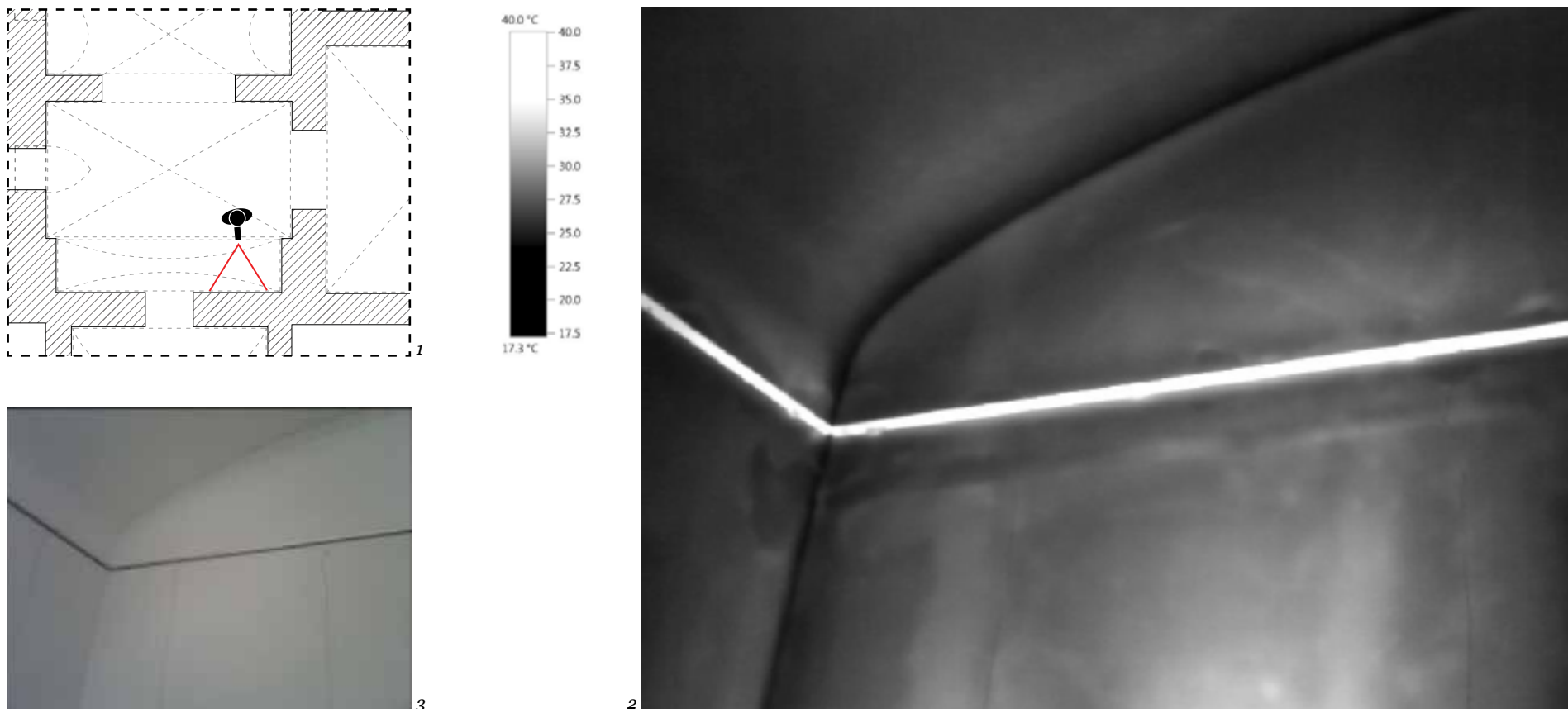
Sala I8

Ai fini di studiare il maschio murario circolare che prosegue fino al Vestibolo, si era pensato di effettuare delle indagini termografiche con riscaldamento attivo dalla parte della sala I8, in modo da mettere quanto meno in evidenza la tessitura muraria. Le prove da questa posizione si sono rivelate però fallimentari, mettendo in evidenza solamente il passaggio degli impianti. Tuttavia siamo riusciti a spostare il punto di osservazione dall'altra parte della parete, riscaldando in qualche maniera la superficie dalla parte delle nicchia delle scale antiche. In questo caso i risultati si sono rivelati assolutamente migliori: la tessitura muraria è apparsa visibile in maniera piuttosto distinta, permettendo una misurazione piuttosto accurata dei conci utilizzati. I conci in tufo in questo caso presentano dimensioni differenti da quelli incontrati finora con una larghezza pari a 35 cm e un'altezza pari a circa 24/25 cm.

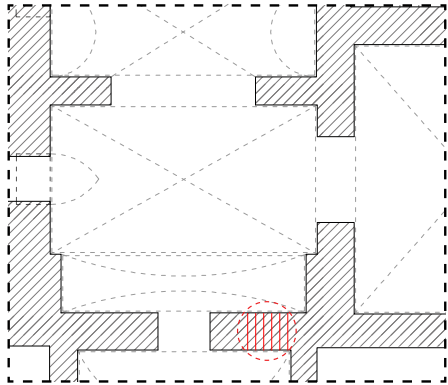
Per qualificare ulteriormente la struttura si era scelto di effettuare anche un prova sonica per trasparenza sulla stessa parete. L'indagine non si è rivelata di facile attuazione, sia a causa della parete curva che non rende facile costruire due griglie corrispondenti, sia a causa della presenza di un pannello espositivo di cartongesso dalle parte della sala I8. In ogni caso alla fine è stato possibile ritagliare comunque una griglia 75x75 cm nella parte di parete più vicina al passaggio.



4.36. Termografia I4_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Sono osservabili delle linee molto leggere orizzontali che potrebbero indicare l'altezza dei corsi di mattoni, pari a circa 20 centimetri.



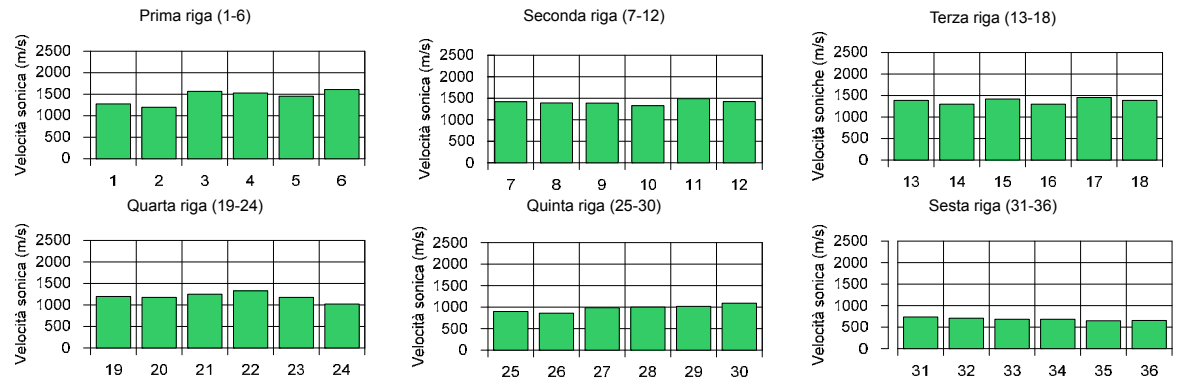
4.37. Termografia I4_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). La fascia più calda, posizionata a 211 cm dal livello di calpestio e di altezza pari a circa 5 cm, potrebbe indicare il passaggio di un qualche impianto.



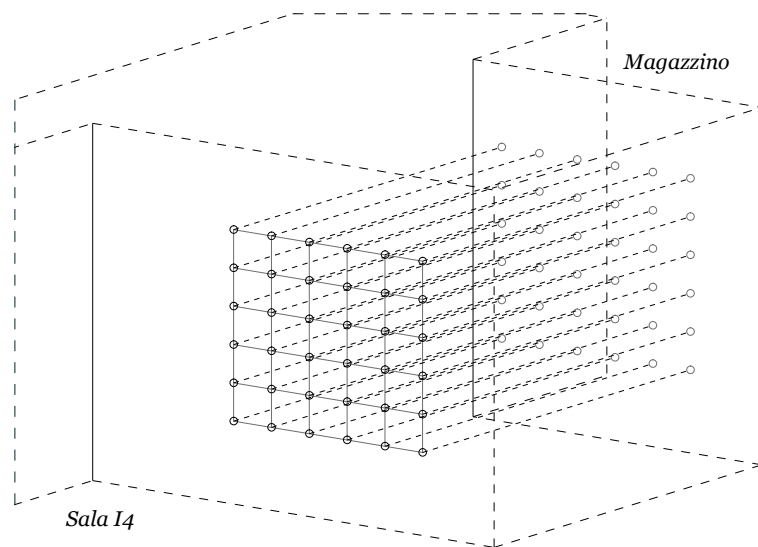
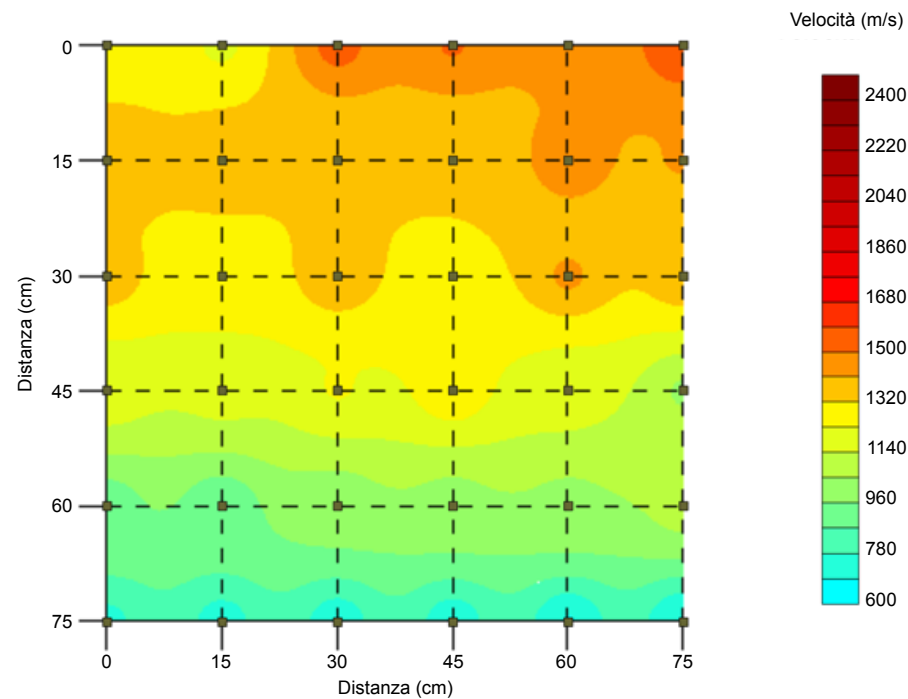
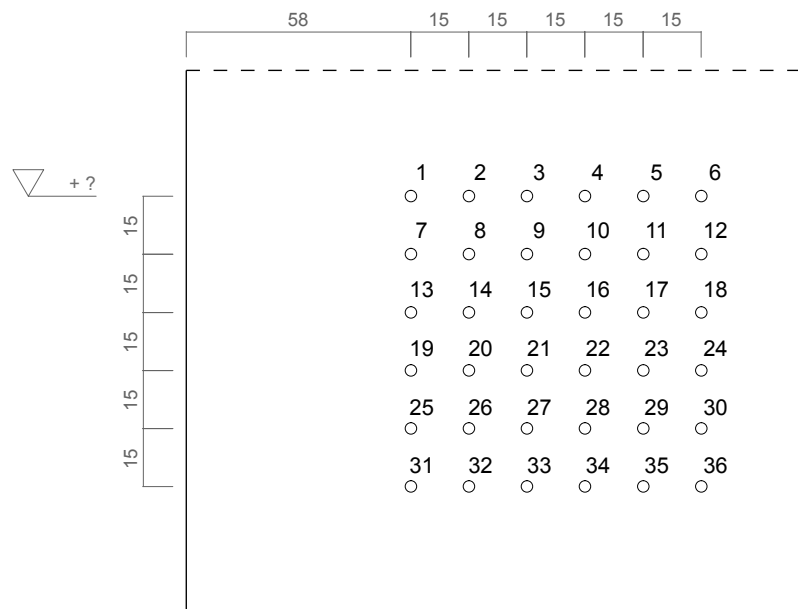
Velocità minima (m/s)	
punto 35	650
Velocità massima (m/s)	
punto 6	1609
Velocità media (m/s)	
1179	
Deviazione standard (m/s)	
288	

Punto di prova	Tempo (μs)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
1	958	1.22	1273
2	1019	1.22	1197
3	779	1.22	1566
4	799	1.22	1527
5	839	1.22	1454
6	758	1.22	1609
7	859	1.22	1420
8	878	1.22	1390
9	879	1.22	1388
10	919	1.22	1328
11	819	1.22	1490
12	858	1.22	1422
13	879	1.22	1388
14	939	1.22	1299
15	859	1.22	1420
16	939	1.22	1299
17	839	1.22	1454
18	878	1.22	1390

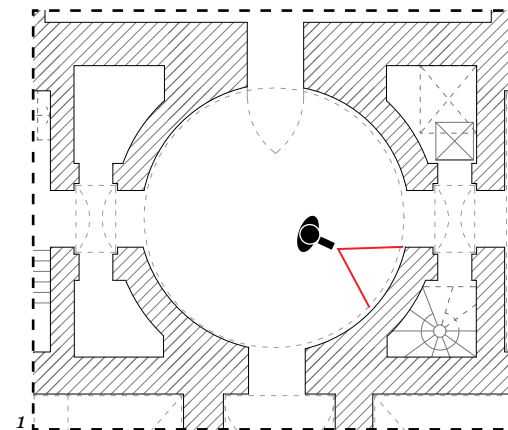
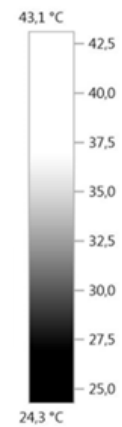
Punto di prova	Tempo (μs)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
19	1019	1.22	1197
20	1039	1.22	1174
21	978	1.22	1247
22	919	1.22	1328
23	1039	1.22	1174
24	1198	1.22	1018
25	1359	1.22	898
26	1419	1.22	860
27	1239	1.22	985
28	1219	1.22	1001
29	1198	1.22	1018
30	1119	1.22	1090
31	1658	1.22	736
32	1718	1.22	710
33	1778	1.22	686
34	1779	1.22	686
35	1878	1.22	650
36	1858	1.22	657



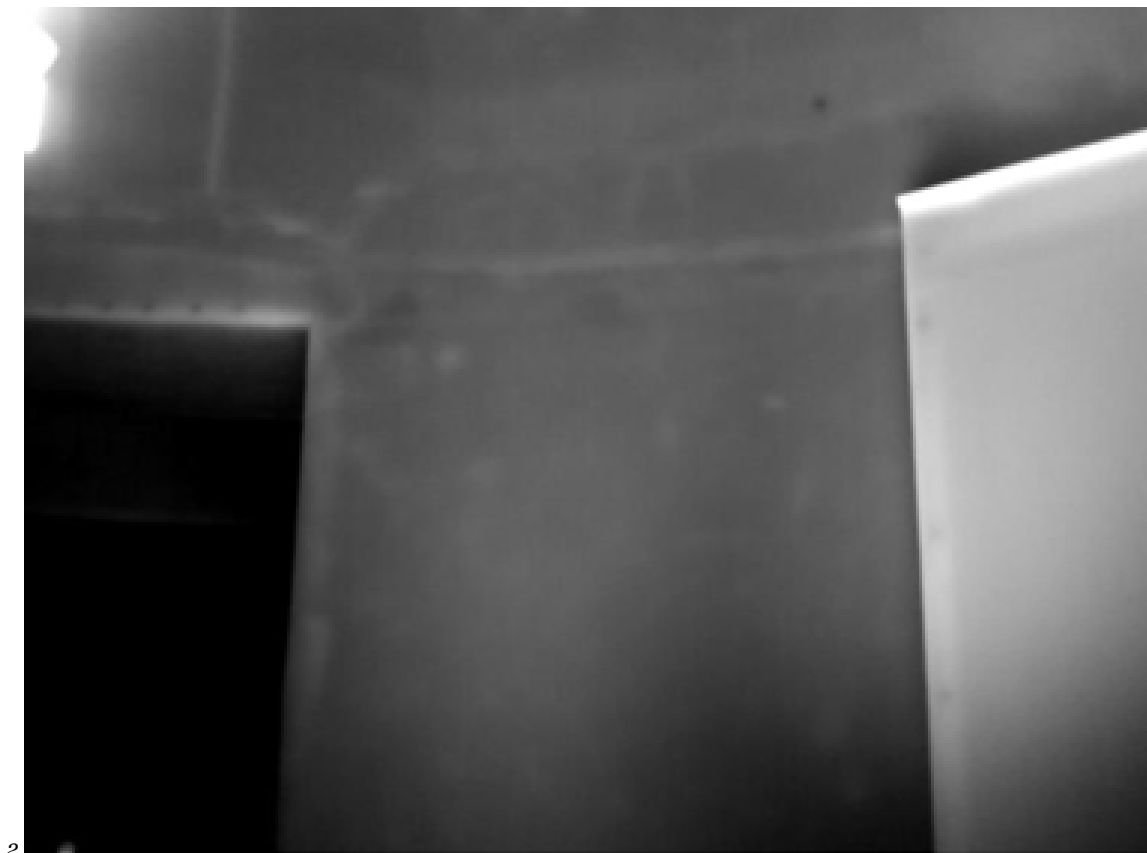
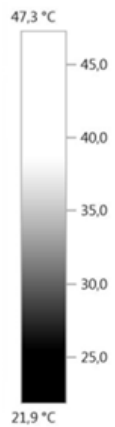
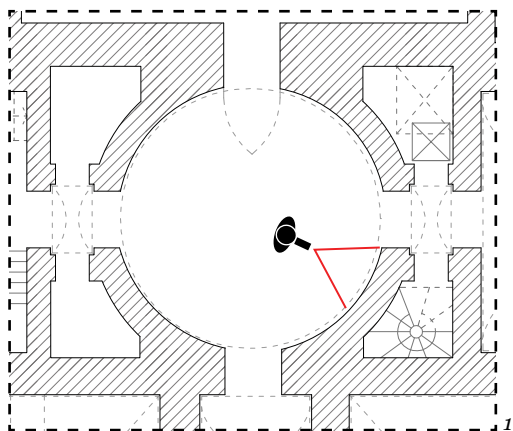
4.38. Indagine sonora I4, prima scheda: a sinistra in alto la localizzazione della prova; a destra la tabella con le velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto; a sinistra al centro una tabellina con le statistiche principali; a destra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni riga.



4.39. Indagine sonica I4, seconda scheda: in alto la griglia di punti utilizzata, quotata in centimetri e la rappresentazione grafica dei risultati di prova secondo la velocità di propagazione delle onde elastiche; in basso una ricostruzione tridimensionale della porzione di struttura oggetto della prova.



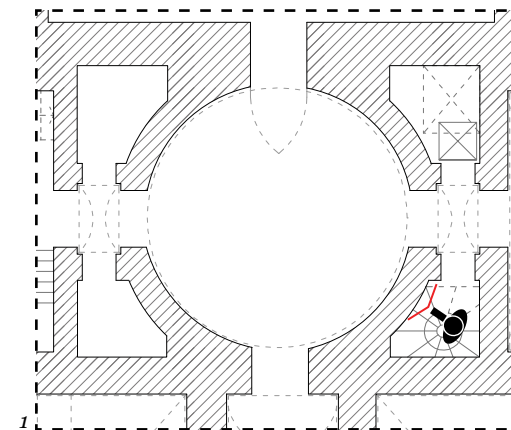
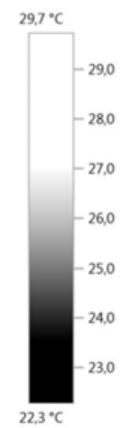
4.40. Termografia I8_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3).



4.41. Termografia I8_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). In questa termografia e in quella precedente non è osservabile alcun indizio degno di nota, ad esclusione del punto di passaggio degli impianti.



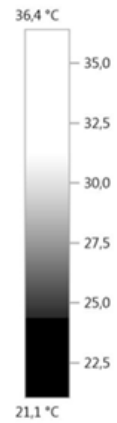
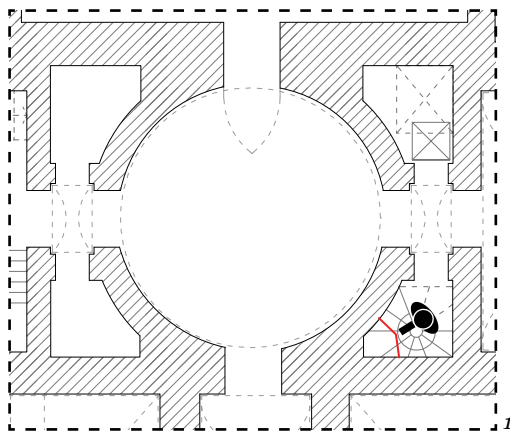
2



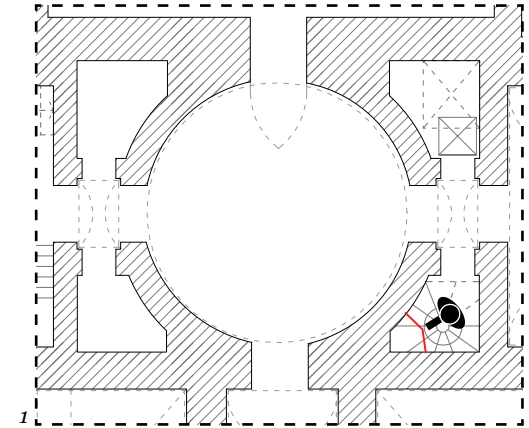
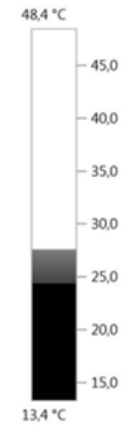
3



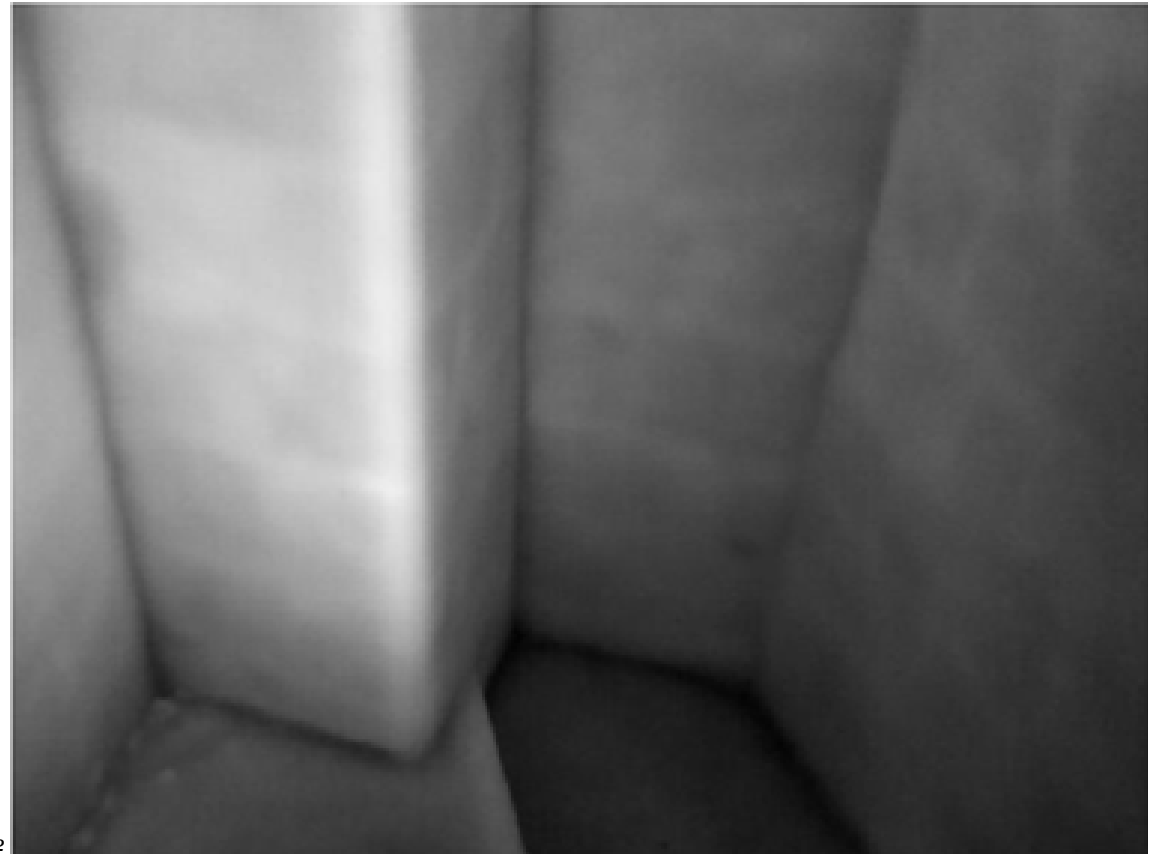
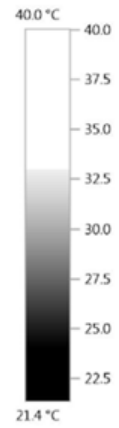
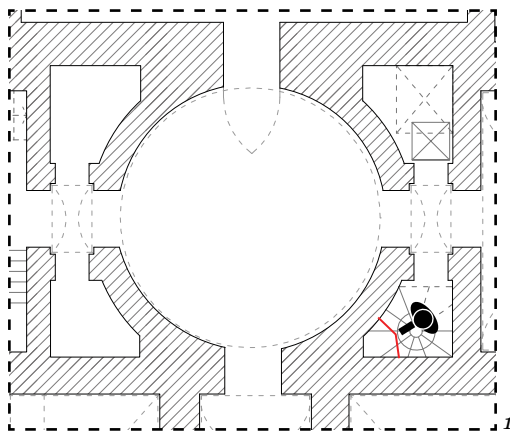
4.42. Termografia Nicchia_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). SSI può leggere chiaramente la tessitura muraria e i punti di passaggio degli impianti.



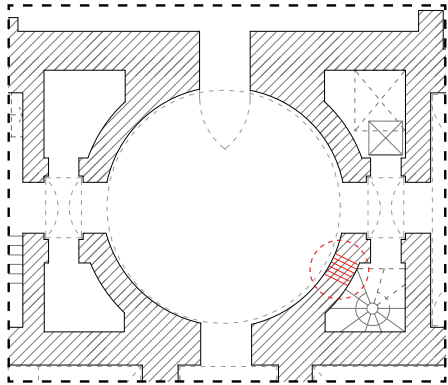
4.43. Termografia Nicchia_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). La chiarezza dell'immagine in questo punto ha permesso una misurazione approssimativa dei blocchi, qui larghi circa 35 cm e alti circa 24/25 cm.



4.44. Termografia Nicchia_3: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Oltre alla tessitura è leggermente visibile anche la modalità di ammassamento in questo punto.



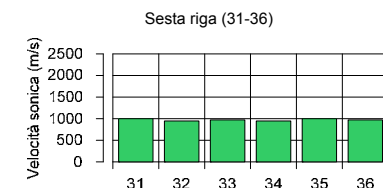
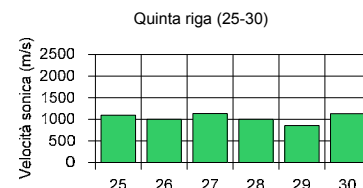
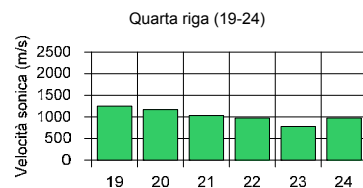
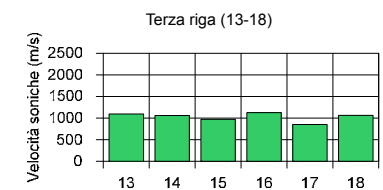
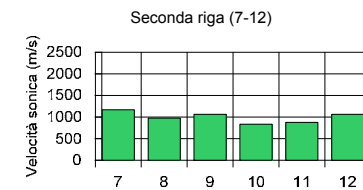
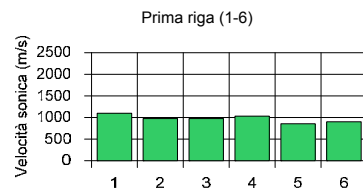
4.45. Termografia Nicchia_4: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Questa è forse l'immagine più chiara, con le tessiture perfettamente visibili, come anche la corrispondenza dei corsi tra le pareti presenti.



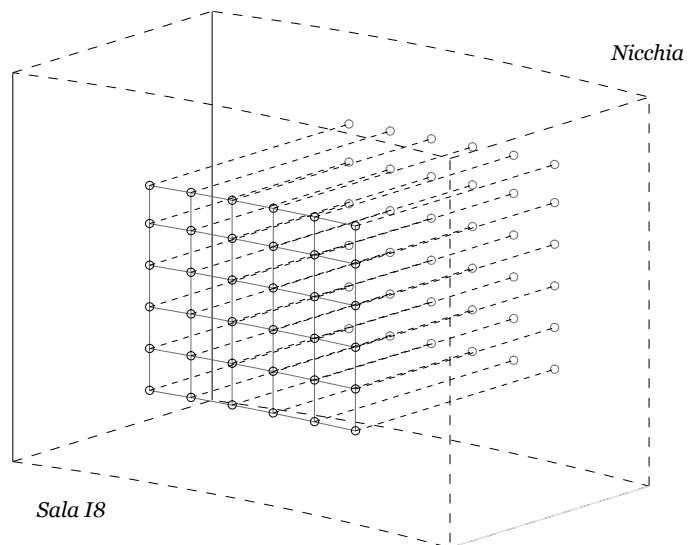
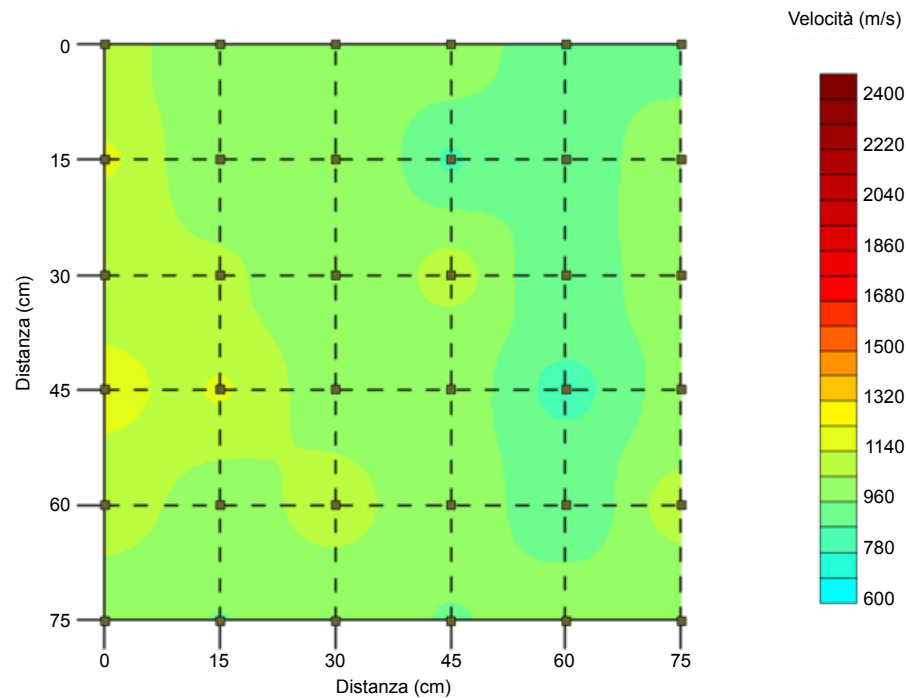
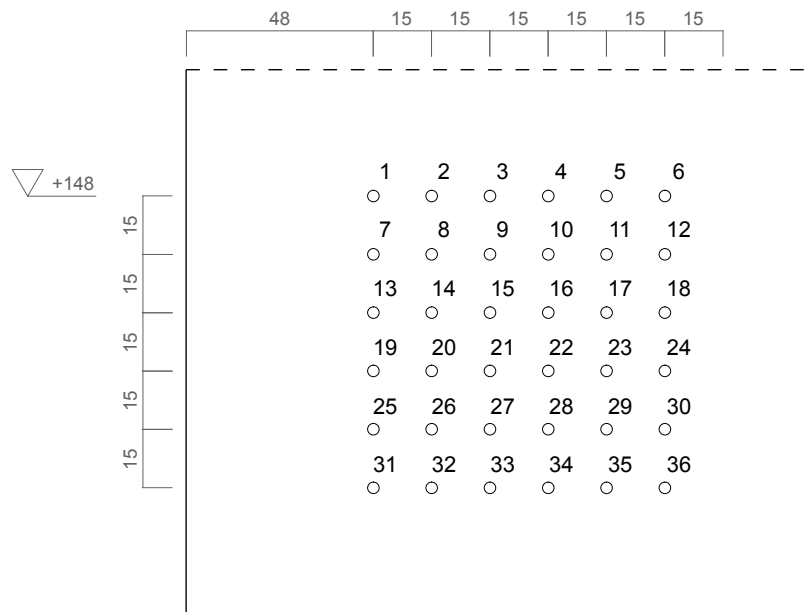
Velocità minima (m/s)	
punto 23	779
Velocità massima (m/s)	
punto 19	1250
Velocità media (m/s)	
1006	
Deviazione standard (m/s)	
106	

Punto di prova	Tempo (μs)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
1	639	0.70	1095
2	719	0.70	974
3	719	0.70	974
4	679	0.70	1031
5	818	0.70	856
6	779	0.70	899
7	599	0.70	1169
8	718	0.70	975
9	659	0.70	1062
10	839	0.70	834
11	798	0.70	877
12	658	0.70	1064
13	639	0.70	1095
14	659	0.70	1062
15	719	0.70	974
16	620	0.70	1129
17	820	0.70	854
18	658	0.70	1064

Punto di prova	Tempo (μs)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
19	1019	0.70	1250
20	1039	0.70	1169
21	978	0.70	1031
22	919	0.70	974
23	1039	0.70	779
24	1198	0.70	974
25	1359	0.70	1095
26	1419	0.70	1001
27	1239	0.70	1133
28	1219	0.70	1000
29	1198	0.70	855
30	1119	0.70	1131
31	1658	0.70	1001
32	1718	0.70	949
33	1778	0.70	975
34	1779	0.70	947
35	1878	0.70	1001
36	1858	0.70	974



4.46. Indagine sonora 18, prima scheda: a sinistra in alto la localizzazione della prova; a destra la tabella con le velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto; a sinistra al centro una tabellina con le statistiche principali; a destra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni riga



4.47. Indagine sonica I8, seconda scheda: in alto la griglia di punti utilizzata, quotata in centimetri e la rappresentazione grafica dei risultati di prova secondo la velocità di propagazione delle onde elastiche; in basso una ricostruzione tridimensionale della porzione di struttura oggetto della prova.

Sala I9

In questa sala era stata prevista ed è stata effettuata solamente una prova sonica di trasparenza della parete in condivisione con la sala I10. La prova aveva il fine di caratterizzare i maschi murari di controvento, ed è stata realizzata secondo le modalità già viste in precedenza con l'applicazione dell'usuale griglia 75x75 cm.

Sala I3

Questa prova sonica è stata introdotta il giorno stesso della missione, in quanto si riteneva interessante caratterizzare un arco che non trova corrispondenze nella sala simmetricamente opposta e che, casualmente, è in corrispondenza di una sala, quella rossa, che al piano superiore presenta un quadro fessurativo piuttosto esteso. Si è quindi deciso di procedere quantomeno con una indagine sonica di trasparenza, in sostituzione dell'endoscopia inizialmente prevista nel progetto originale. Per le modalità di esecuzione si sono seguite quelle già viste in precedenza per l'arco longitudinale della sala I6, cercando di coprire con la griglia quanta più superficie possibile.

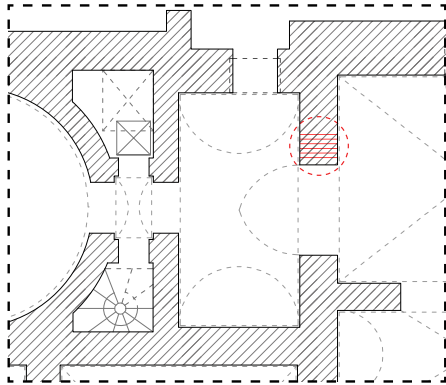
Sala I11

Un'altra prova molto rapida che si è deciso di eseguire il giorno stesso è stata relativa ad almeno uno degli ambienti di passaggio presenti nel piano, che dovevano essere interessati, nel progetto originale, da numerose prove tra cui anche endoscopie e carotaggi. Attraverso una indagine termografica con riscaldamento attivo, si è cercato di raccogliere informazioni riguardo la composizione degli archi relativi ai passaggi e alle volte degli stessi. Per quanto riguarda gli archi è stato possibile osservare una fascia abbastanza omogenea di materiale più freddo all'intradosso, e in alcuni casi anche una tessitura muraria: si presume la presenza di una struttura in mattoni pieni di materiale sconosciuto. Nell'intradosso delle volte è invece solamente osservabile un quadro fessurativo, che si estende anche agli archi dei passaggi: questo è già stato descritto in precedenza nel paragrafo relativo alle fessurazioni, ed è stato interpretato come una conseguenza del passaggio degli impianti.

Sala I12

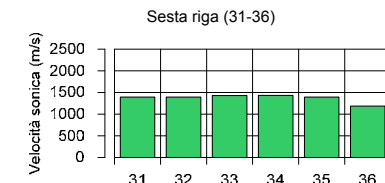
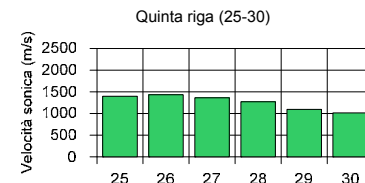
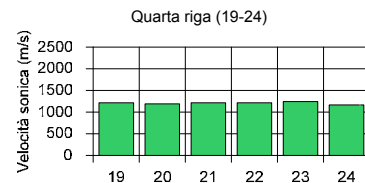
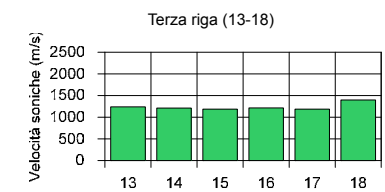
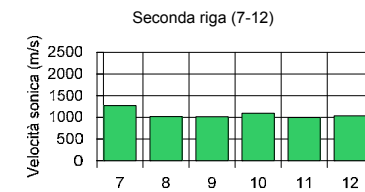
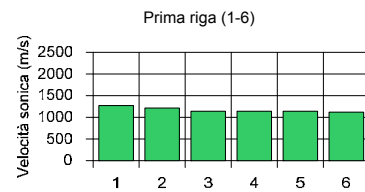
L'endoscopia in questa sala è stata decisa all'ultimo, in quanto visto l'ulteriore tempo lasciatici a disposizione, abbiamo ritenuto utile studiare con questa tecnica almeno un arco di quelli presenti

al piano seminterrato. In particolare quello presente in questa sala si rivelava particolarmente interessante, vista la particolare disposizione in diagonale, in netta contrapposizione con tutti gli altri elementi della Villa fortemente ortogonali. Mantenendo le misure già adottate nella sala I10, con fori di spessore 18 mm e profondità massima di 40 cm, sono state effettuate due perforazioni nelle due direzioni ortogonali, in corrispondenza dei reni nell'angolo nord-ovest della sala. Come nel caso della sala I10, le informazioni ottenute sono il risultato di un confronto tra i cambi di materiale osservabili con l'endoscopio e il materiale fuoriuscito durante la perforazione. Anche qui la stratigrafia si è rivelata molto interessante: il foro dal basso verso l'alto ha rivelato la presenza di uno strato d'intonaco di circa 2 cm, con successivi 8 cm costituiti da un materiale piuttosto scuro, possibilmente mattone, e quindi il solito materiale più chiaro fino alla fine dell'endoscopia, identificabile come tufo; il foro laterale invece, è stato evidentemente realizzato in corrispondenza dei conci di tufo, dato che dopo gli usuali 2 cm di intonaco ha incontrato fino alla fine lo stesso materiale incontrato nella parte finale della endoscopia verticale.

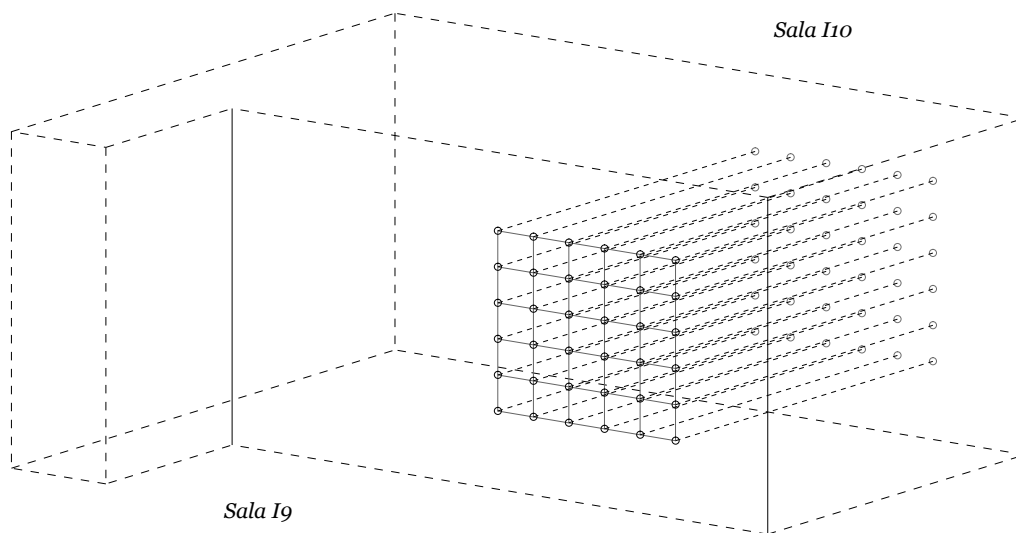
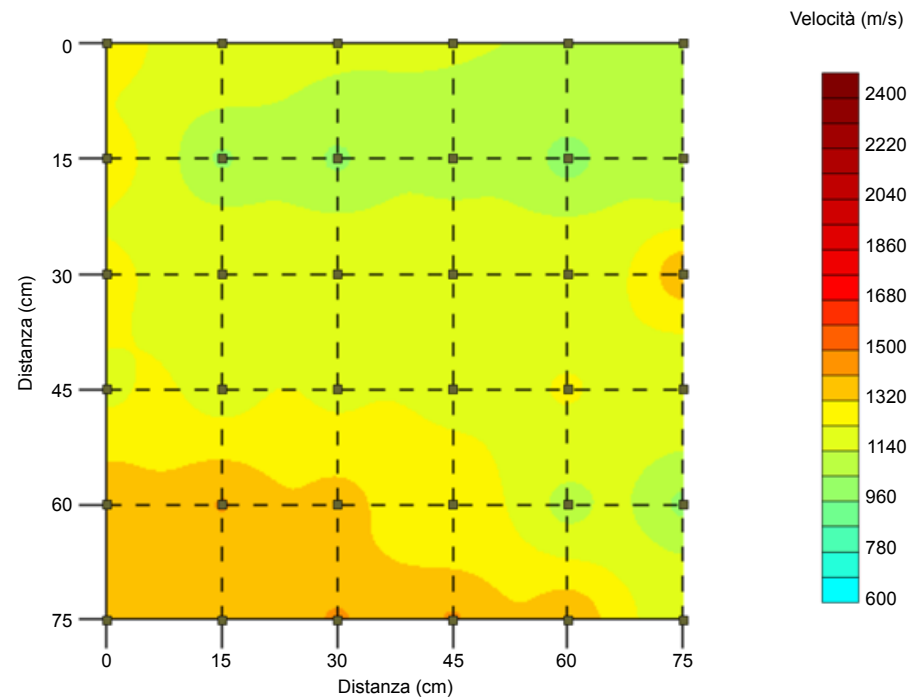
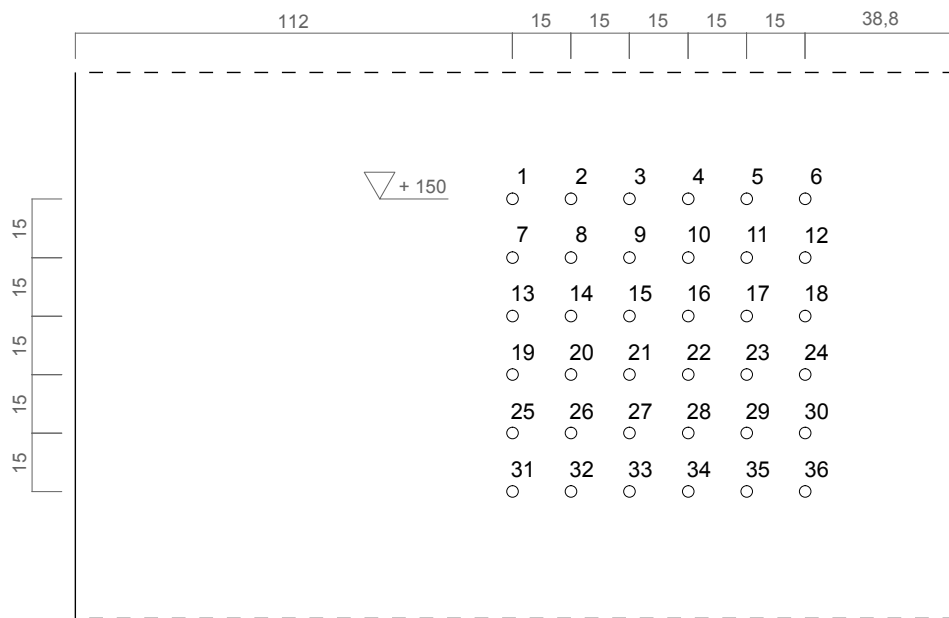


Velocità minima (m/s)	
punto 11	997
Velocità massima (m/s)	
punto 34	1433
Velocità media (m/s)	
1221	
Deviazione standard (m/s)	
131	

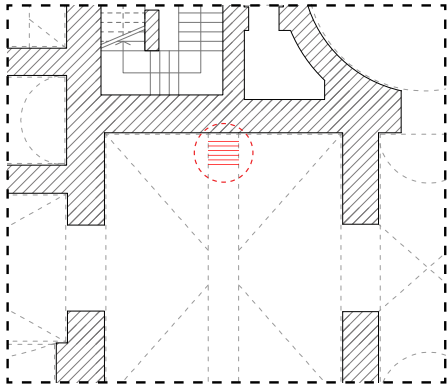
Punto di prova	Tempo (μ s)	Spessore (m)	Velocità (m/s)	Punto di prova	Tempo (μ s)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
1	878	1.12	1270	19	918	1.12	1215
2	918	1.12	1215	20	938	1.12	1189
3	978	1.12	1140	21	918	1.12	1215
4	978	1.12	1140	22	918	1.12	1215
5	978	1.12	1140	23	898	1.12	1242
6	998	1.12	1117	24	958	1.12	1164
7	878	1.12	1270	25	798	1.12	1397
8	1097	1.12	1016	26	778	1.12	1433
9	1098	1.12	1015	27	819	1.12	1361
10	1018	1.12	1095	28	878	1.12	1270
11	1118	1.12	997	29	1018	1.12	1095
12	1078	1.12	1034	30	1098	1.12	1015
13	898	1.12	1242	31	799	1.12	1395
14	919	1.12	1213	32	798	1.12	1397
15	938	1.12	1189	33	779	1.12	1431
16	918	1.12	1215	34	778	1.12	1433
17	938	1.12	1189	35	798	1.12	1397
18	798	1.12	1397	36	938	1.12	1189



4.48. Indagine sonora I9, prima scheda: a sinistra in alto la localizzazione della prova; a destra la tabella con le velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto; a sinistra al centro una tabellina con le statistiche principali; a destra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni riga.



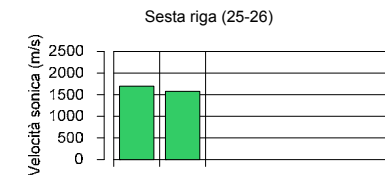
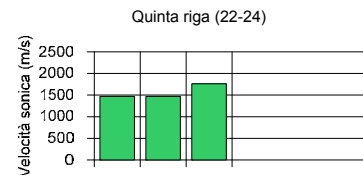
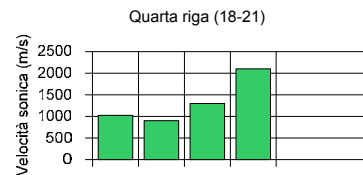
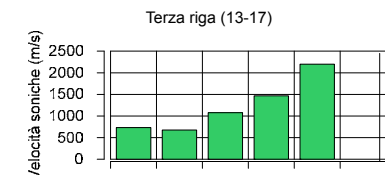
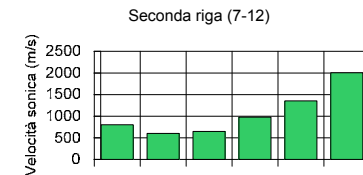
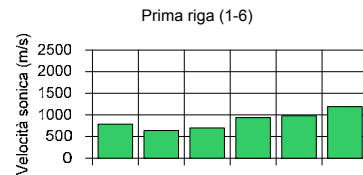
4.49. Indagine sonica I9, seconda scheda: in alto la griglia di punti utilizzata, quotata in centimetri e la rappresentazione grafica dei risultati di prova secondo la velocità di propagazione delle onde elastiche; in basso una ricostruzione tridimensionale della porzione di struttura oggetto della prova.



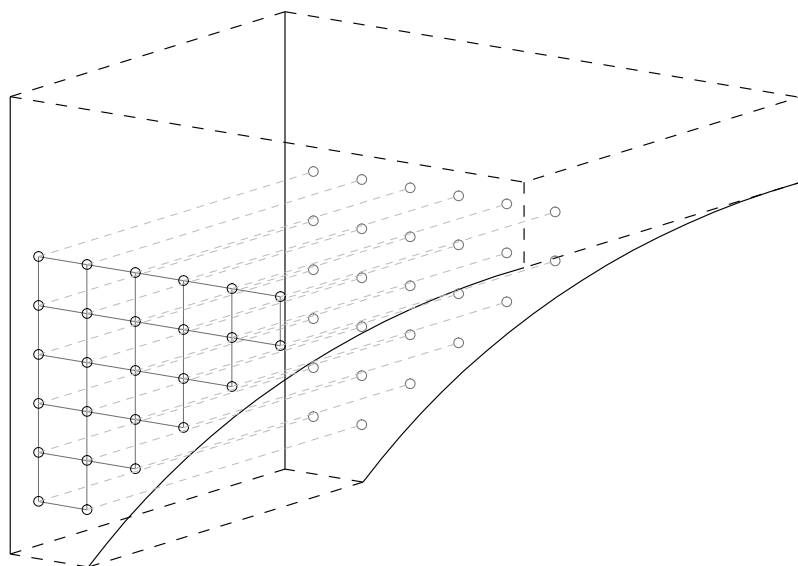
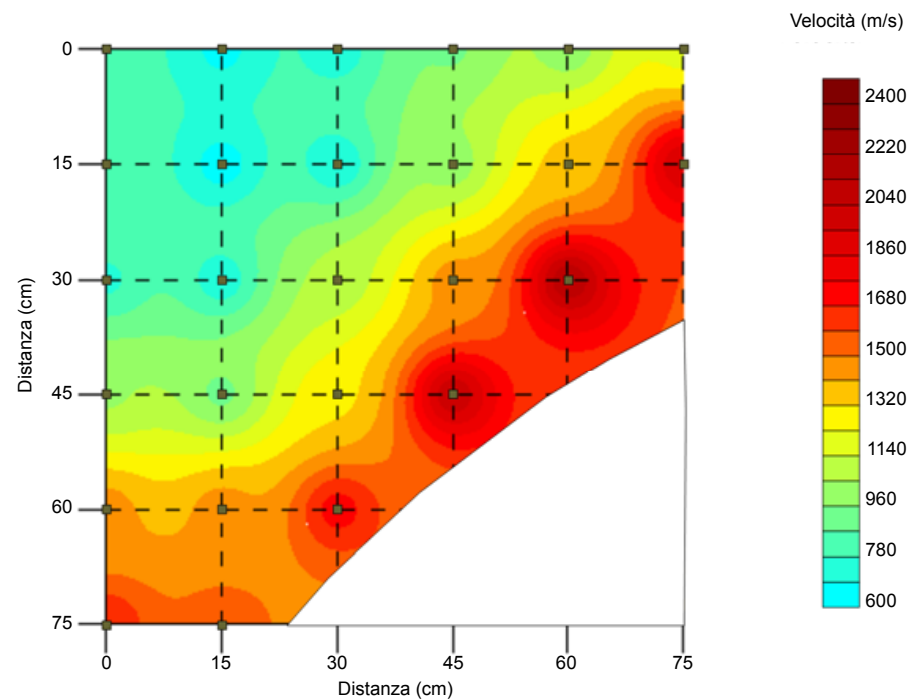
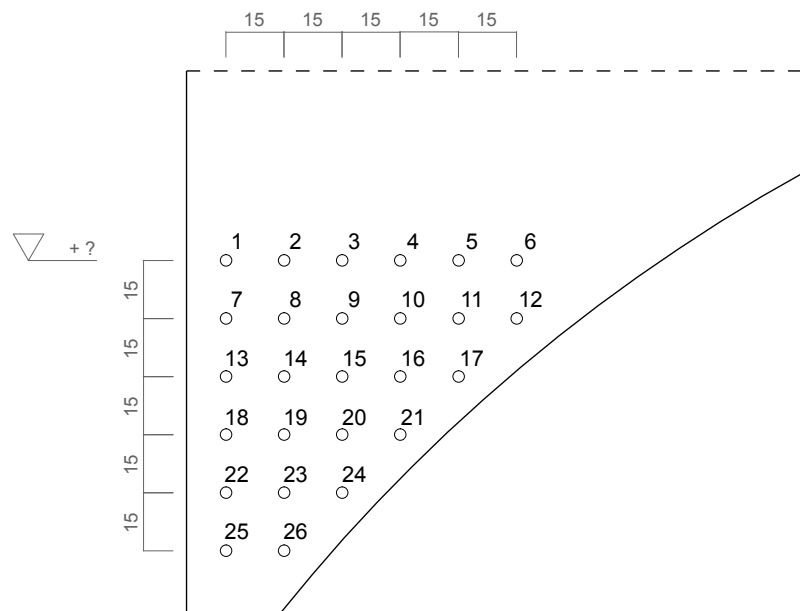
Velocità minima (m/s)	
punto 8	604
Velocità massima (m/s)	
punto 17	2200
Velocità media (m/s)	
1195	
Deviazione standard (m/s)	
480	

Punto di prova	Tempo (μs)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
1	1118	0.88	787
2	1379	0.88	638
3	1258	0.88	700
4	939	0.88	937
5	899	0.88	979
6	739	0.88	1191
7	1098	0.88	801
8	1458	0.88	604
9	1358	0.88	648
10	898	0.88	980
11	649	0.88	1356
12	439	0.88	2005
13	1199	0.88	734
14	1299	0.88	677
15	818	0.88	1076
16	599	0.88	1469
17	400	0.88	2200

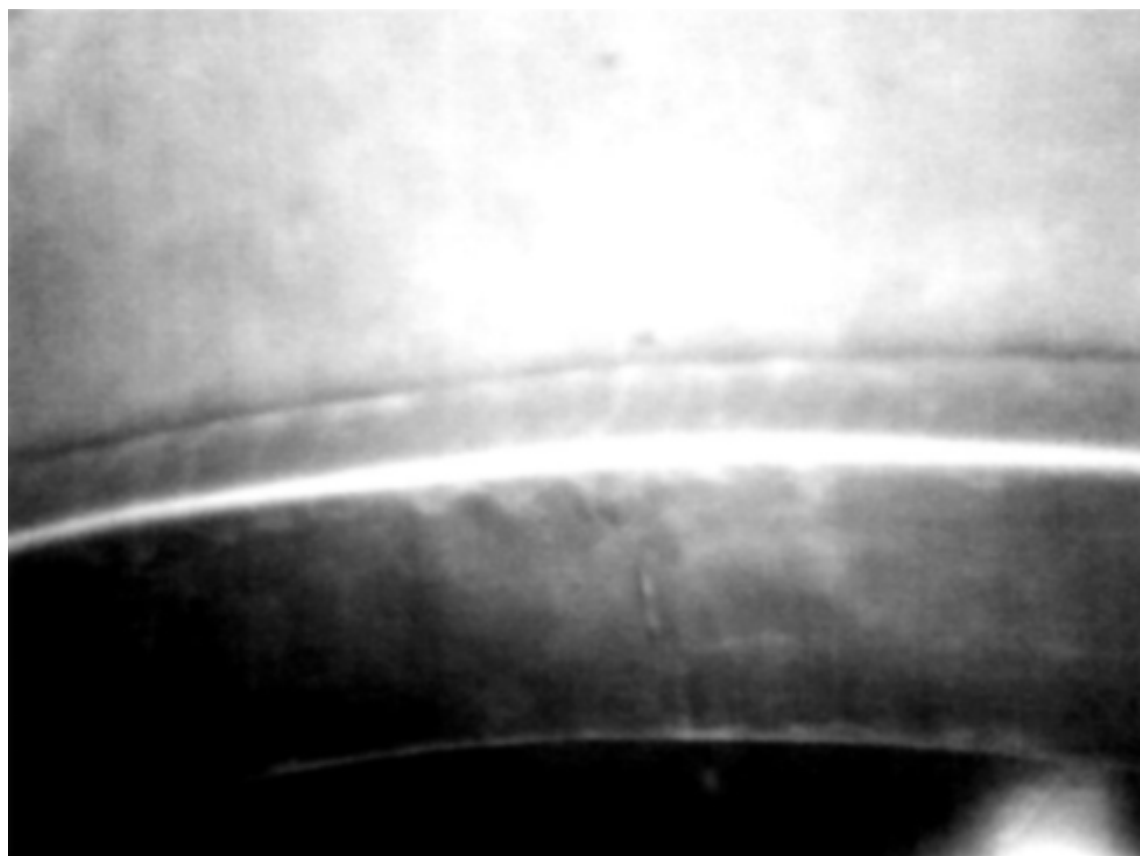
Punto di prova	Tempo (μs)	Spessore (m)	Velocità (m/s)
18	859	0.88	1024
19	978	0.88	900
20	678	0.88	1298
21	419	0.88	2100
22	598	0.88	1472
23	599	0.88	1469
24	499	0.88	1764
25	519	0.88	1696
26	558	0.88	1577



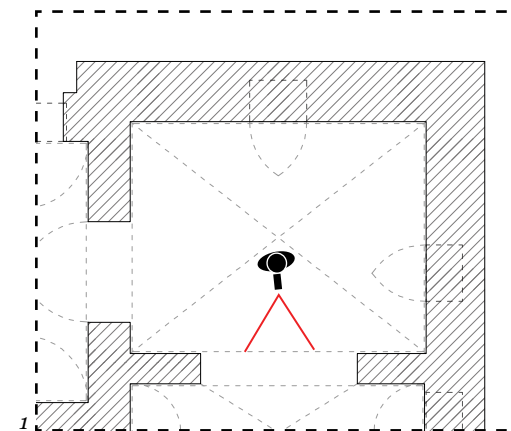
4.50. Indagine sonora I3, prima scheda: a sinistra in alto la localizzazione della prova; a destra la tabella con le velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto; a sinistra al centro una tabellina con le statistiche principali; a destra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni riga.



4.51. Indagine sonora I3, seconda scheda: in alto la griglia di punti utilizzata, quotata in centimetri e la rappresentazione grafica dei risultati di prova secondo la velocità di propagazione delle onde elastiche; in basso una ricostruzione tridimensionale della porzione di struttura oggetto della prova.



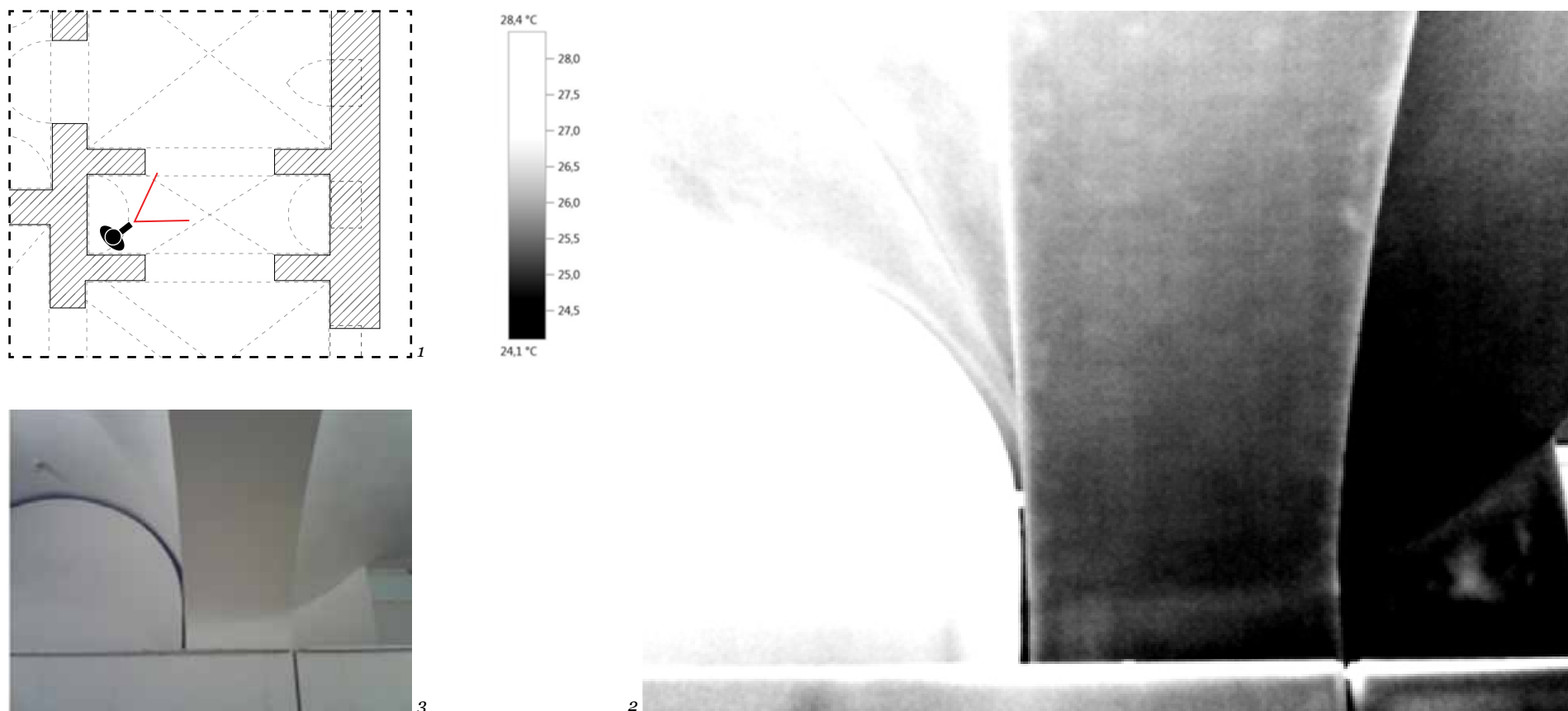
2



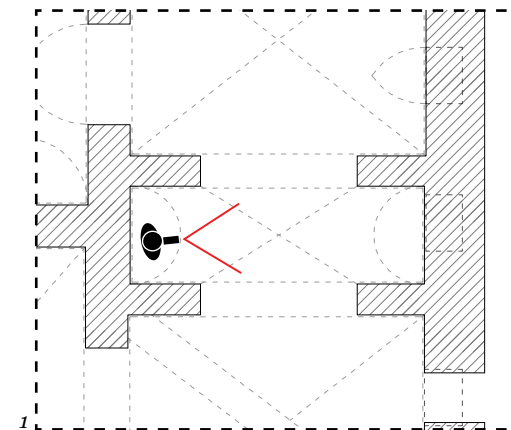
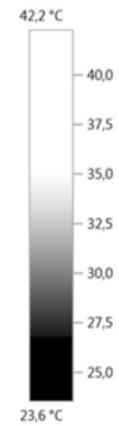
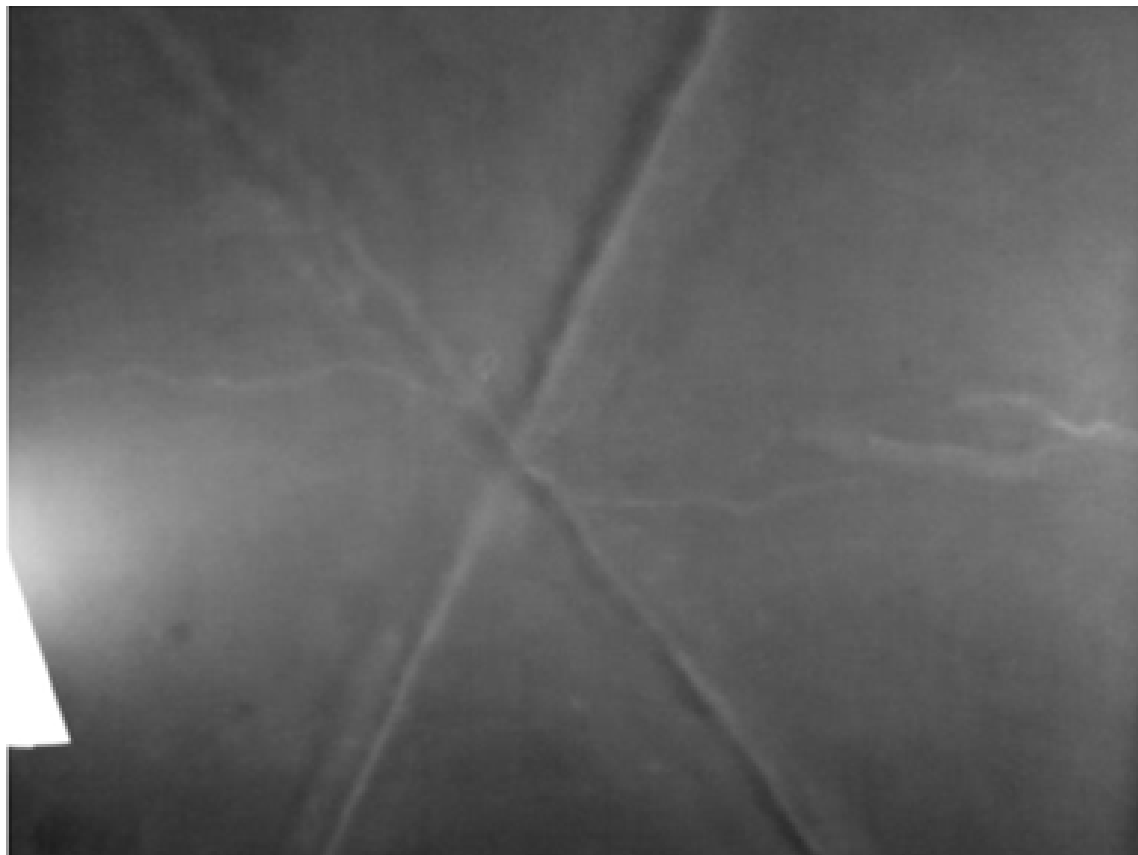
3



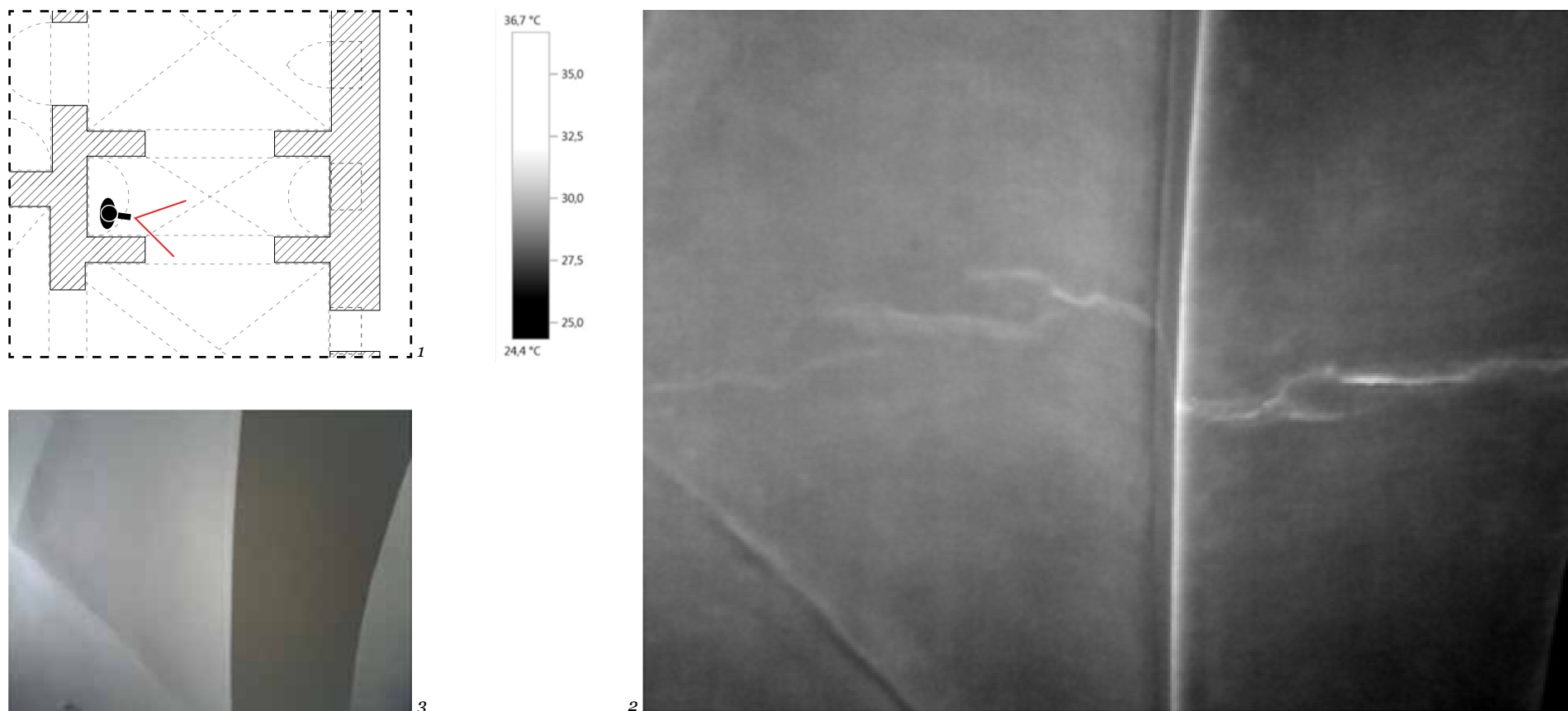
- 4.52. Termografia I11_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). In questa immagine è ben visibile la differenza di temperatura tra l'arco e la volta, indizio che fa presumere la presenza nel primo di mattoni pie



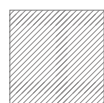
4-53. Termografia I11_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). In questa immagine è anche leggermente visibile una possibile tessitura muraria, anche se la traccia è davvero debole.



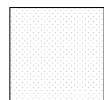
4.54. Termografia I11_3: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Sono visibili le leggere fessurazioni dovute al passaggio di un impianto nell'intradosso della volta.



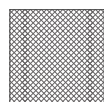
4.55. Termografia I11_4: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Le fessurazioni precedenti proseguono anche nell'intradosso dell'arco di passaggio verso la Sala I12.



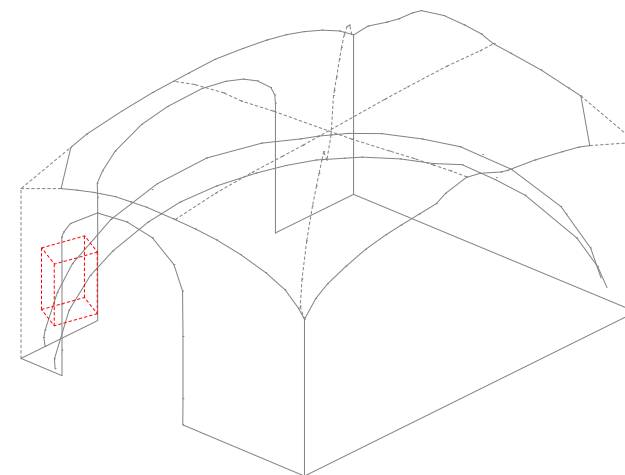
Intonaco



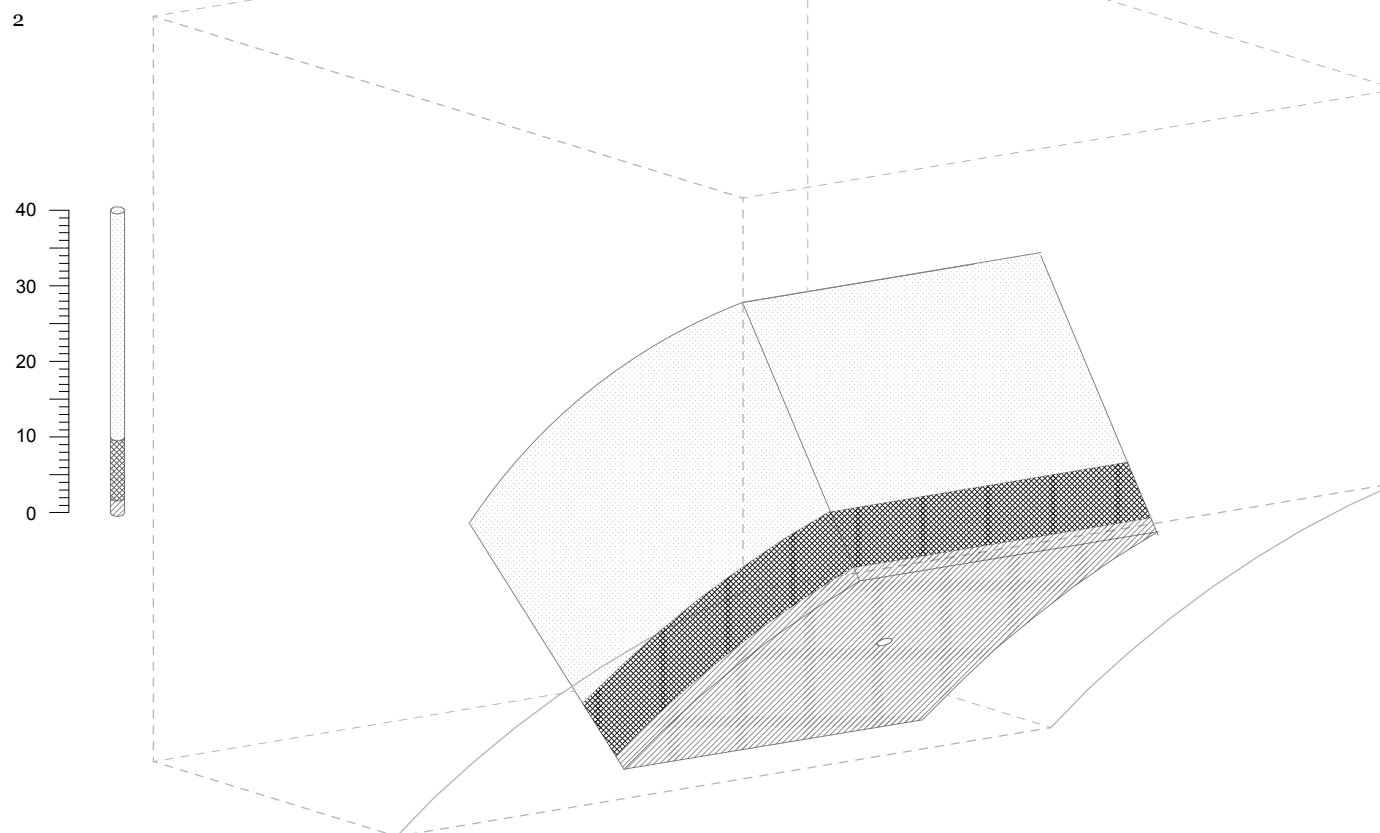
Tufo chiaro



Materiale scuro, probabilmente mattone



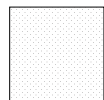
1



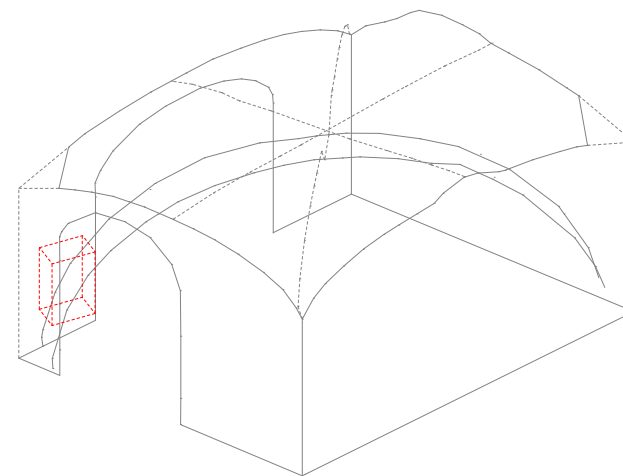
4.56. Endoscopia I12 (foro all'intradosso): localizzazione (1) e rappresentazioni grafiche dei risultati (2), con una simulazione di carotaggio e la ricostruzione di una porzione di struttura secondo i dati raccolti (la porzione di cui si è ricostruita la stratigrafia riguarda soltanto i 40 centimetri dall'intradosso inferiore analizzati).



Intonaco

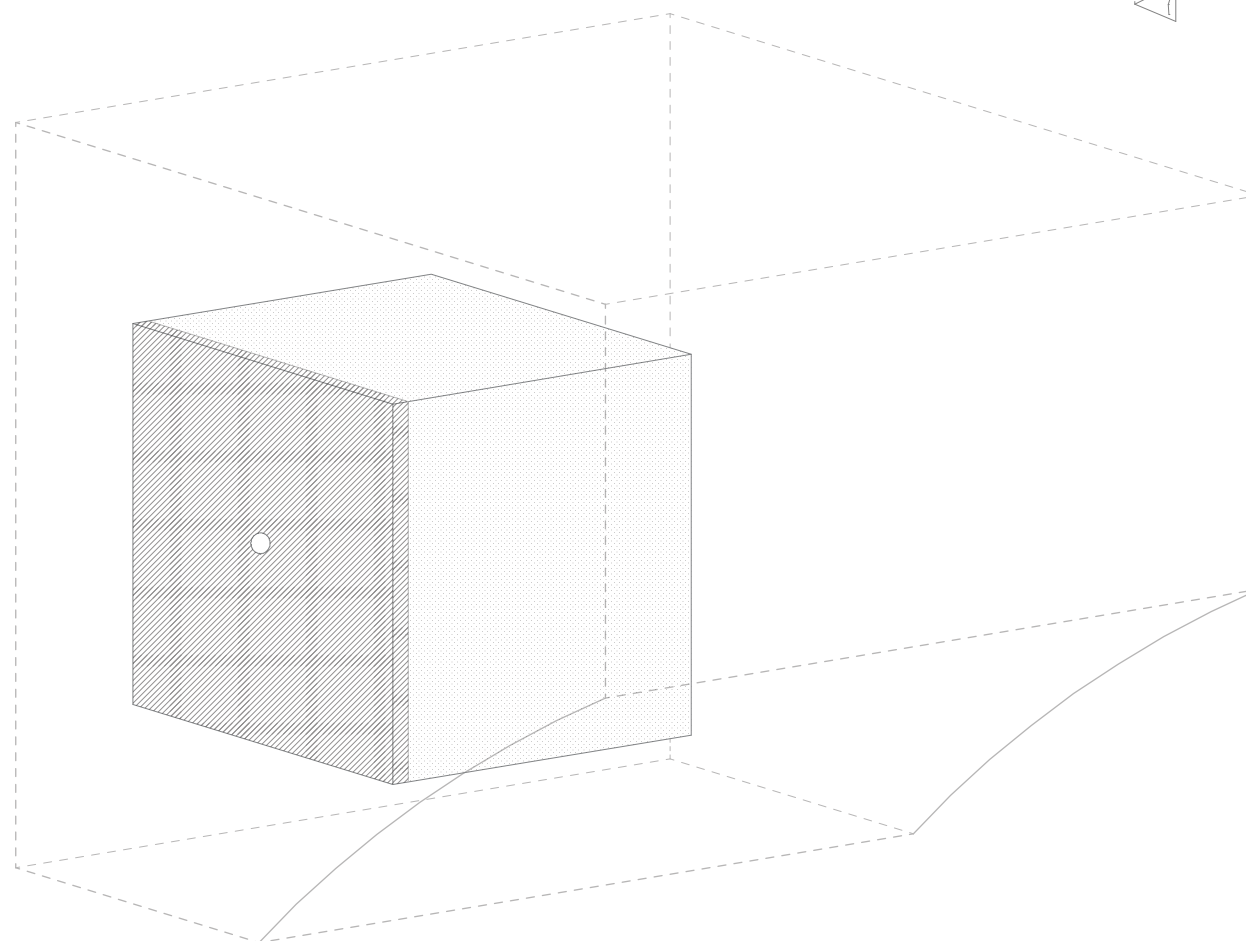
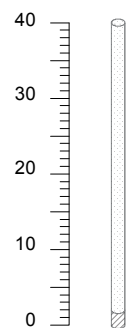


Tufo chiaro



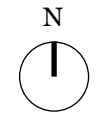
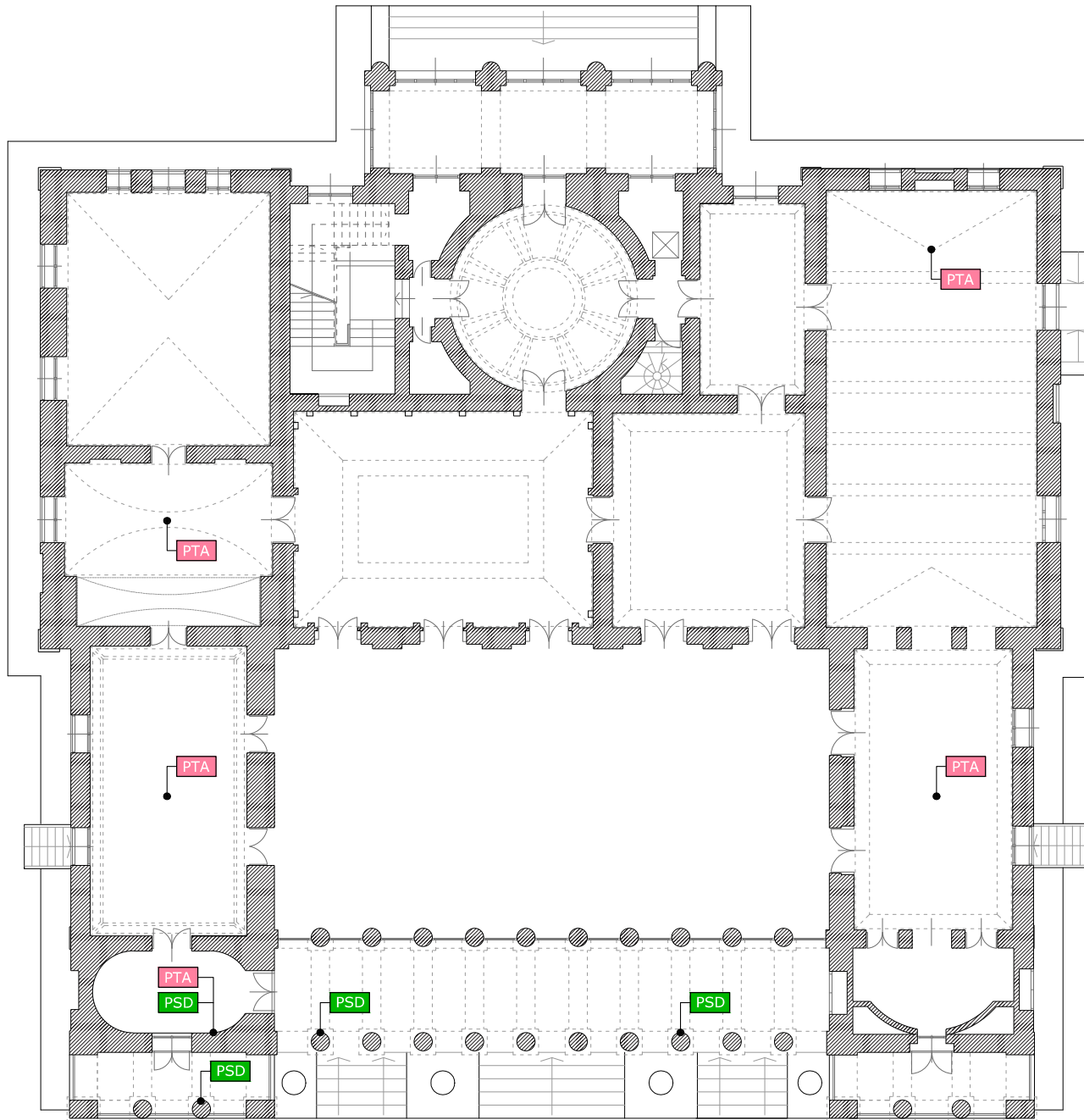
1

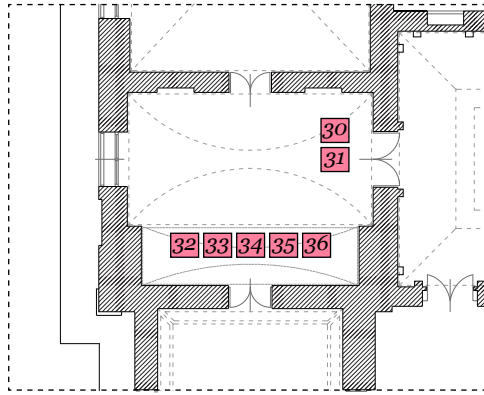
2



4.57. Endoscopia I12 (foro laterale): localizzazione (1) e rappresentazioni grafiche dei risultati (2), con una simulazione di carotaggio e la ricostruzione di una porzione di struttura secondo i dati raccolti (la porzione di cui si è ricostruita la stratigrafia riguarda solo i 40 centimetri interessati dal foro).

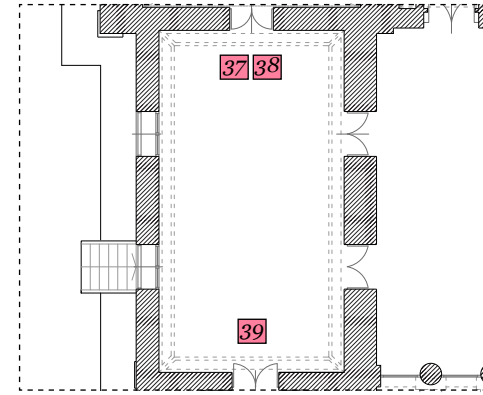
I progetti diagnostici ai piani superiori hanno dovuto subire, come abbiamo visto, una riduzione piuttosto consistente. La delicatezza degli ambienti interni ha infatti limitato di molto il nostro raggio d'azione: infatti anche il solo compiere prove assolutamente non invasive ha richiesto non pochi accorgimenti. In questo caso le limitazioni si sono rivelate decisive, perchè non pochi dubbi permangono tuttora su molti degli elementi strutturali presenti in questo e nel piano sovrastante. Se, per ragioni tecniche, si è rivelato impossibile effettuare le prove soniche di trasparenza inizialmente previste nella Verandina settentrionale, diverse altre indagini sono state aggiunte rispetto al progetto iniziale. Queste, costituite interamente da indagini termografiche con riscaldamento attivo, hanno avuto l'obiettivo di cercare di mettere in luce gli elementi strutturali delle volte e delle pareti, nascosti ad occhio nudo dalla gran quantità di paramenti e di stucchi.





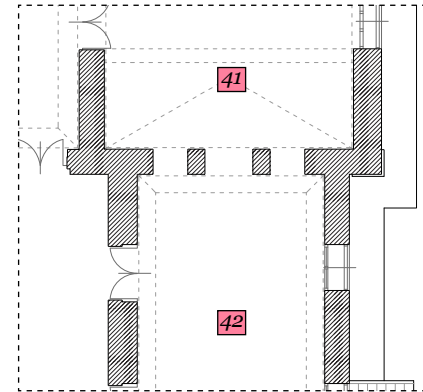
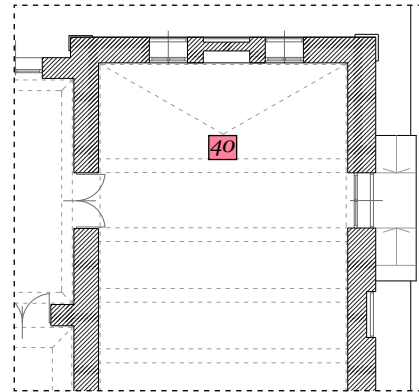
Sala Verde

- PTA 30 Termografia Sala Verde_1
- 31 Termografia Sala Verde_2
- 32 Termografia Sala Verde_3
- 33 Termografia Sala Verde_4
- 34 Termografia Sala Verde_5
- 35 Termografia Sala Verde_6
- 36 Termografia Sala Verde_7



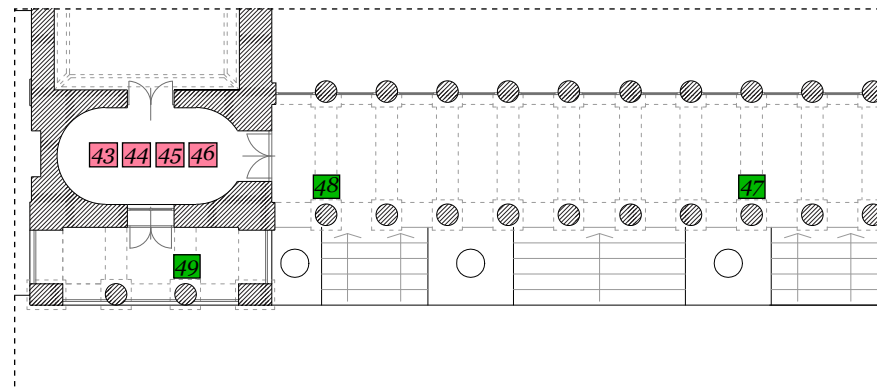
Biblioteca

- PTA 37 Termografia Biblioteca_1
- 38 Termografia Biblioteca_2
- 39 Termografia Biblioteca_3



Sala delle feste

- PTA 40 Termografia Feste Maggiore_1
- 41 Termografia Feste Maggiore_2
- 42 Termografia Feste Minore



Saletta ovale e Portici sud

- PTA 43 Termografia Ovale_1
- 44 Termografia Ovale_2
- 45 Termografia Ovale_3
- 46 Termografia Ovale_4
- 47 Indagine Sonica Colonna_1
- 48 Indagine Sonica Colonna_2
- 49 Indagine Sonica Colonna_3

4.58. Localizzazione delle prove effettuate al piano rialzato (nella pagina precedente) e abaco completo con numerazione.

Sala Verde

Le indagini in questa sala si sono rivelate molto interessanti. Per quanto riguarda le pareti, è stato possibile avere la conferma della presenza di telai, probabilmente lignei, di sostegno del paramento in tessuto. Il suddetto telaio è formato da elementi verticali e orizzontali delle stesse dimensioni che vanno a formare uno schema a quadrati.

Per quanto riguarda le volte a botte è stato possibile intravedere, soprattutto in corrispondenza degli archi, un lieve accenno di tessitura muraria attraverso gli stucchi. In ogni caso i risultati ottenuti confermano la presenza di una volta strutturale a botte e non di una finta volta.

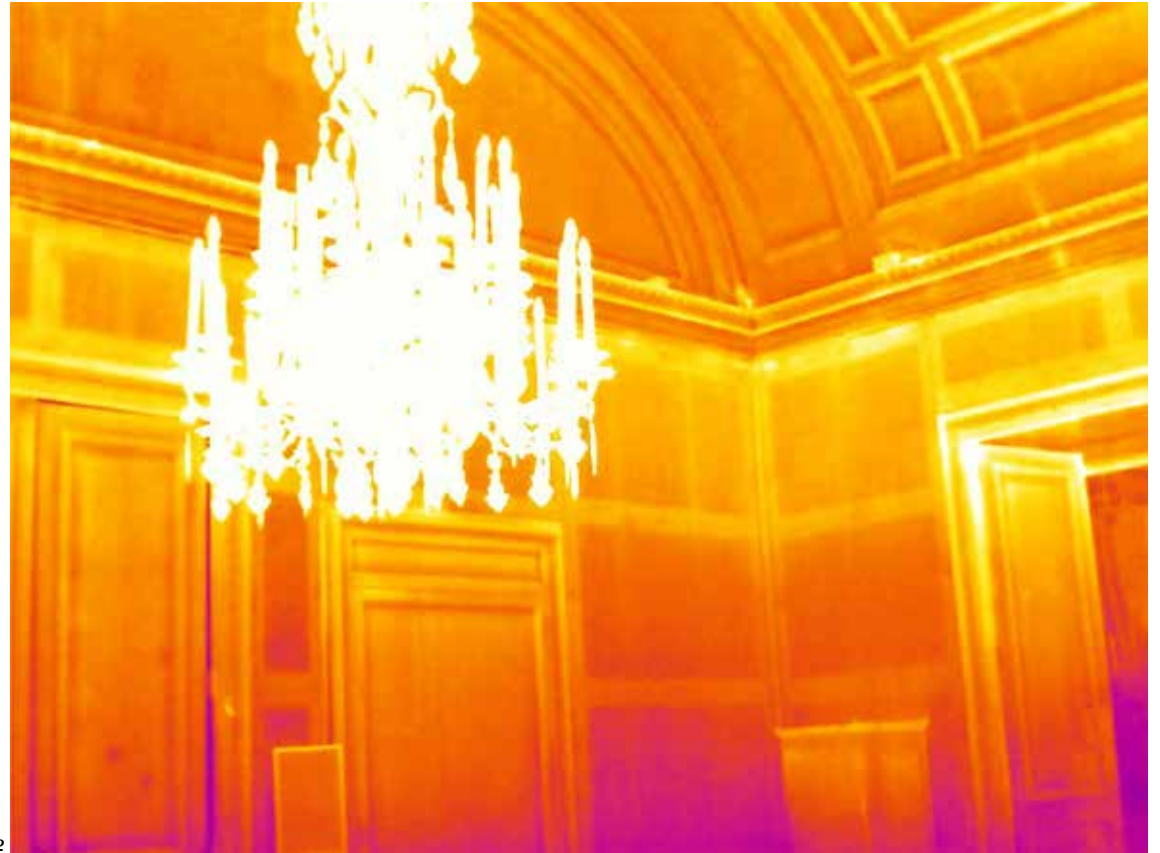
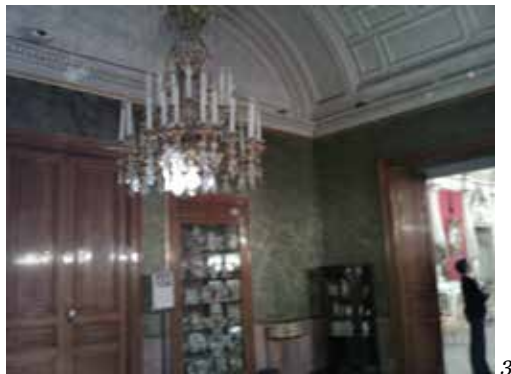
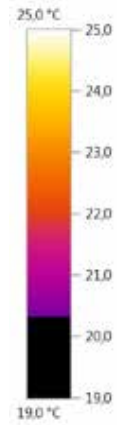
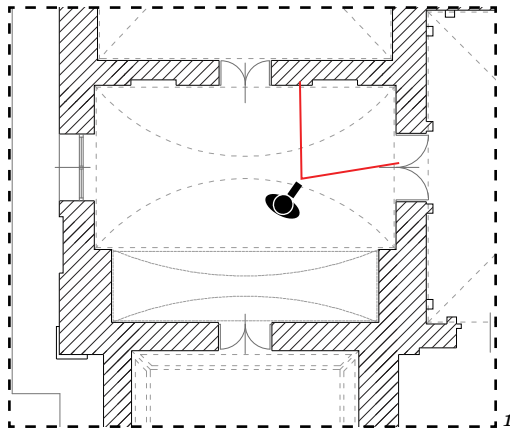
Biblioteca

Molto velocemente, sono state effettuate delle rapide indagini delle pareti e della volta della sala attigua, la Biblioteca. Se la presenza del parato in cuoio e della relativa struttura di supporto ha impedito un qualsiasi risultato apprezzabile per i maschi murari, sulla volta è stato possibile osservare chiaramente osservare il telaio probabilmente ligneo della finta volta; a livello dello specchio è individuabile una massa più scura che ne copre gran parte della superficie, di cui non si è riusciti a dare un'esatta interpretazione.

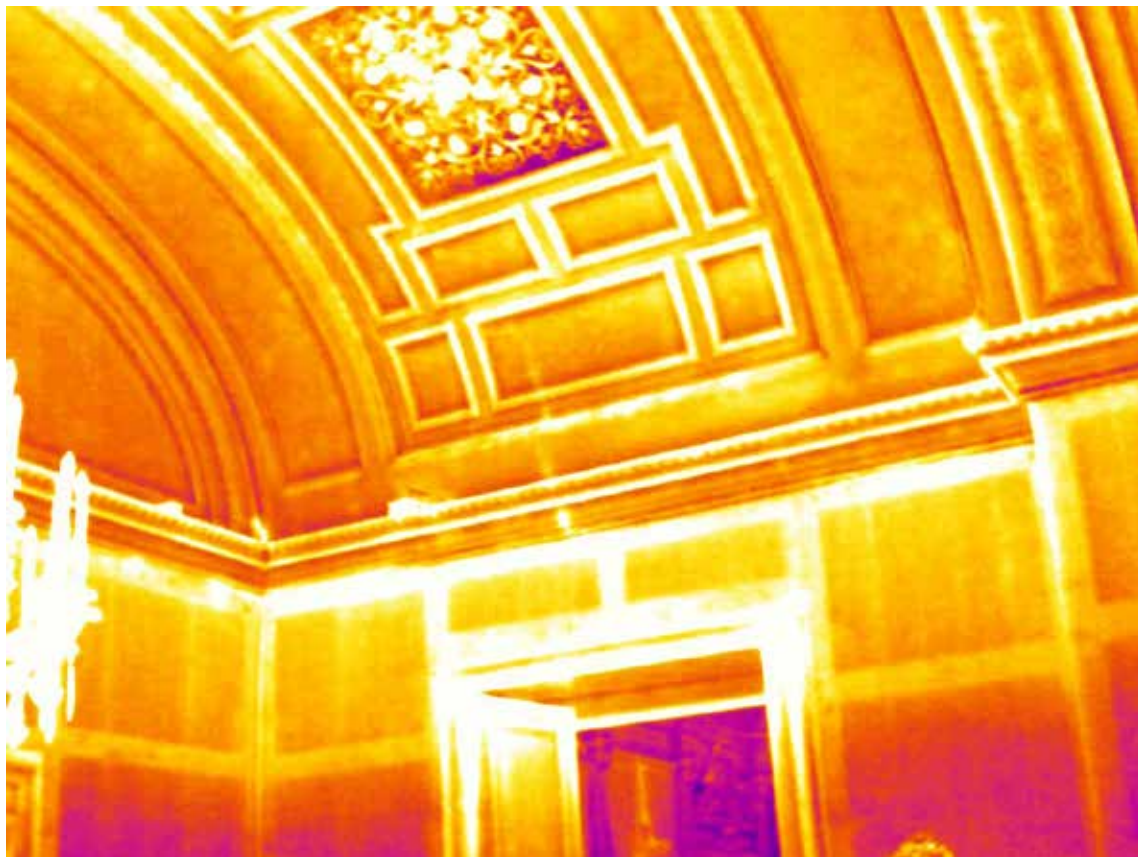
Sala delle feste

Le prove qui condotte si sono concentrate sullo studio delle volte, soprattutto per quanto riguarda la volta dell'ambiente maggiore. Questa presenta una morfologia abbastanza particolare, dato che alle estremità sud e nord si presenta a padiglione, salvo poi assumere l'aspetto di una volta a botte. Le indagini termografiche hanno messo in luce la presenza di un telaio in legno in corrispondenza della porzione a padiglione a nord, e invece una certa uniformità delle porzioni a botte: questo farebbe ipotizzare la presenza di una volta strutturale a botte come nella precedente Sala Verde.

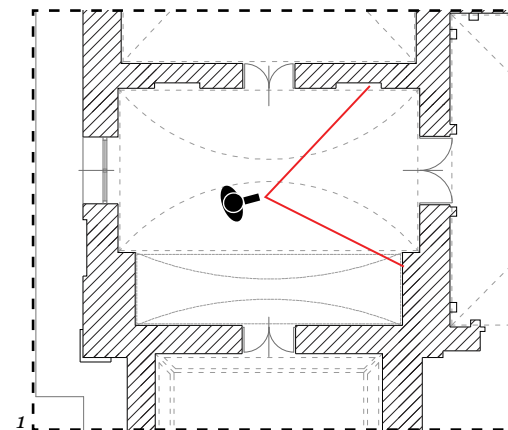
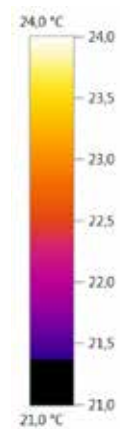
Nell'ambiente minore invece dalla termografia si può leggere chiaramente un telaio a maglia regolare quadrata in corrispondenza dello specchio della volta, ma soprattutto, guardando con attenzione, anche degli elementi verticali sempre relativi ad un telaio nelle parti inclinate. Questi elementi suggerirebbero la presenza di una finta volta.



4.59. Termografia Sala Verde_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Lo schema del telaio del parato in tessuto verde è perfettamente visibile.



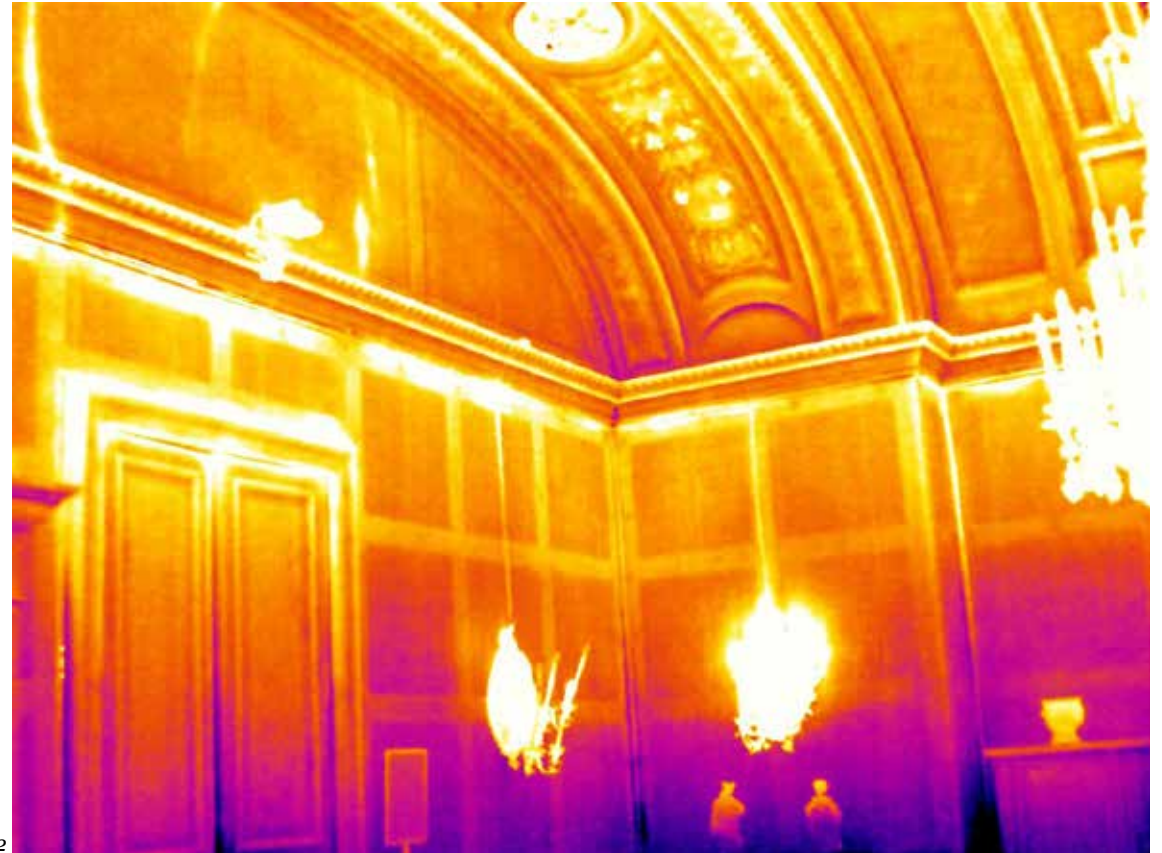
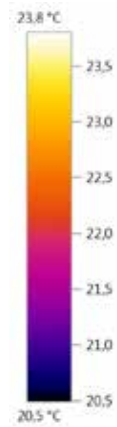
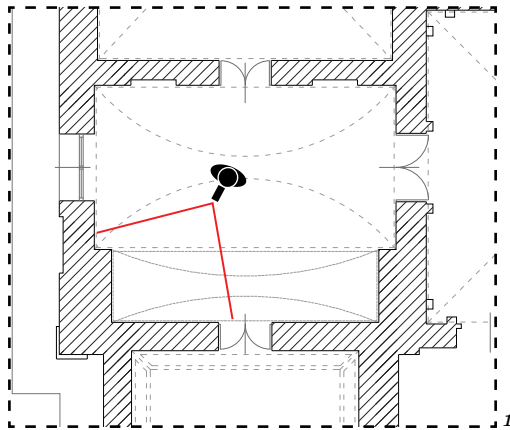
2



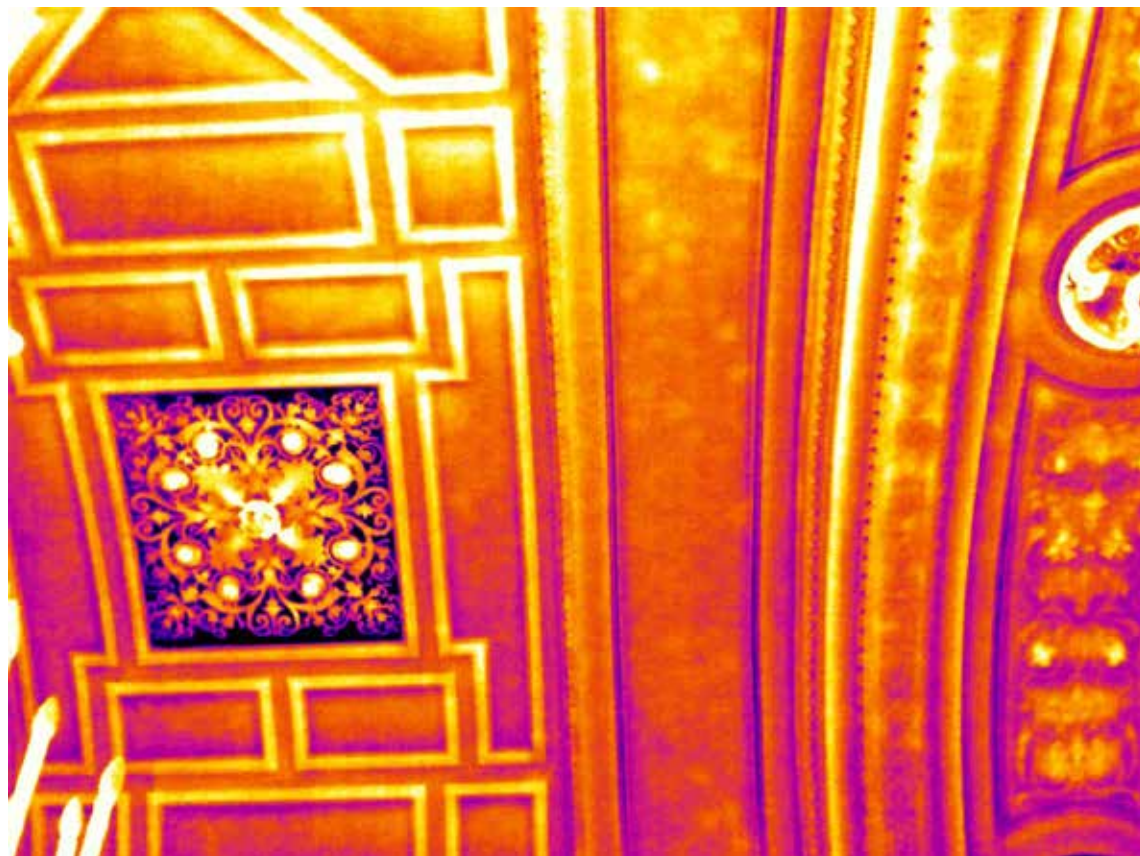
3



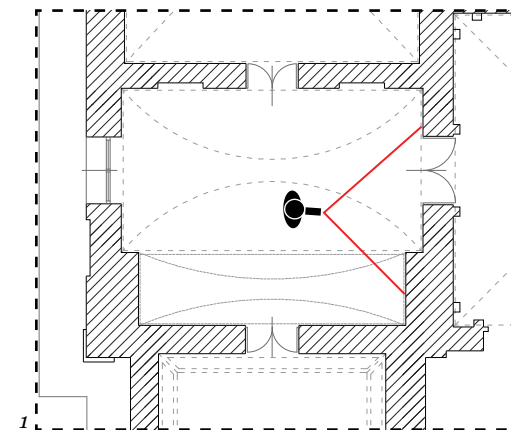
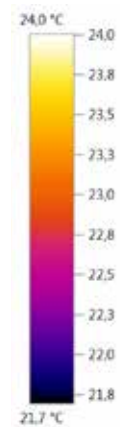
4.60. Termografia Sala Verde_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Ancora il telaio di supporto al parato, e uno scorcio della volta, in cui è possibile osservare una delle fessurazioni più importanti della sala.



4.61. Termografia Sala Verde_3: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Oltre al telaio, si possono osservare le fessurazioni sulla lunetta sud, distinguendone meglio i diversi livelli di sviluppo rispetto all'immagine ad occhio nudo.



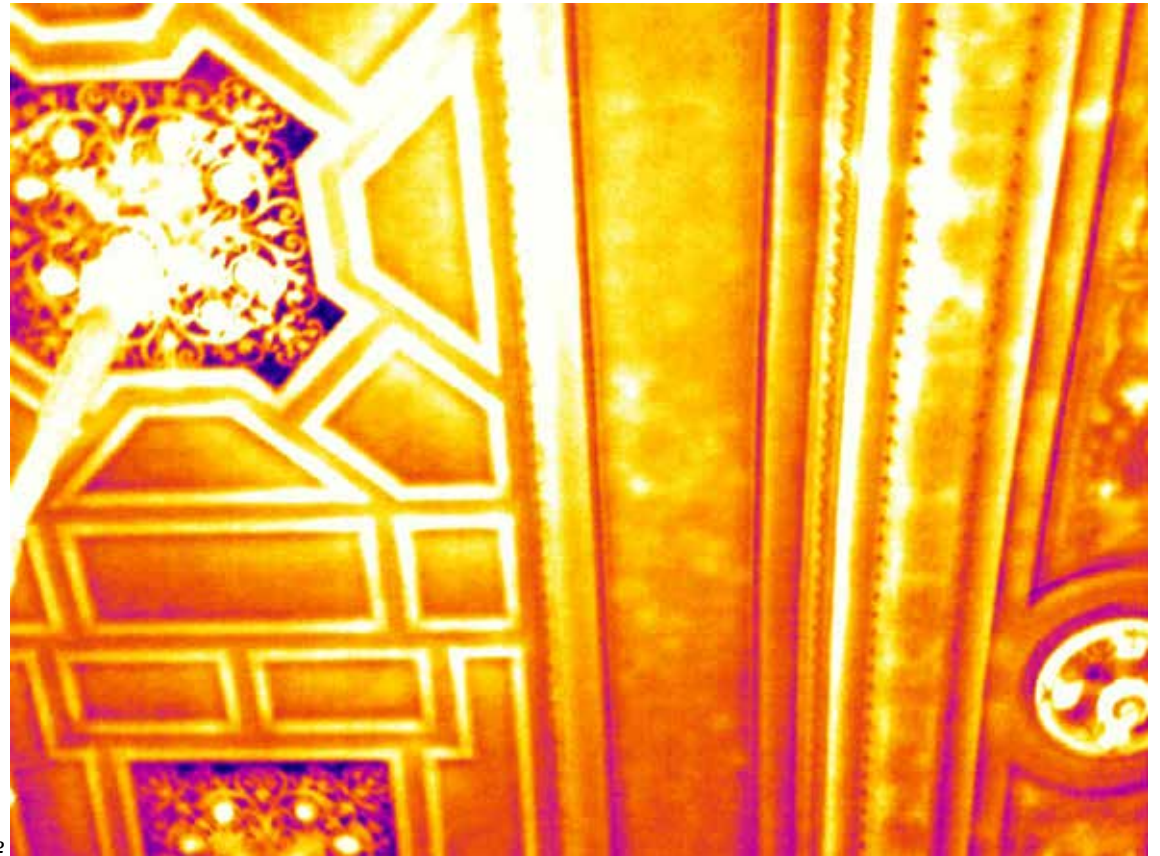
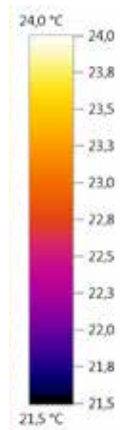
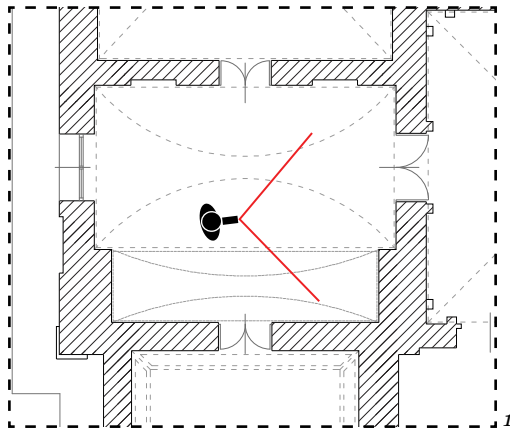
2



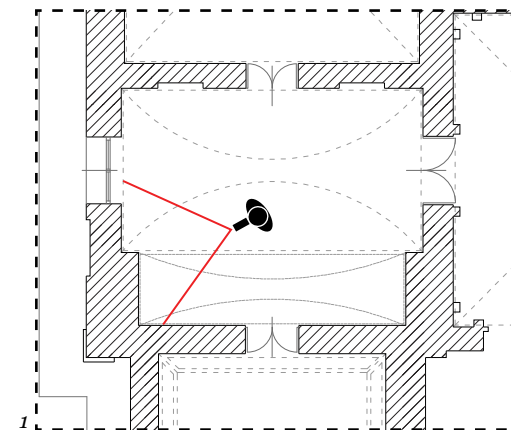
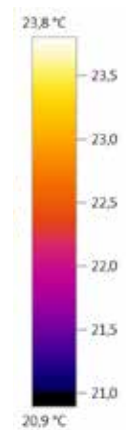
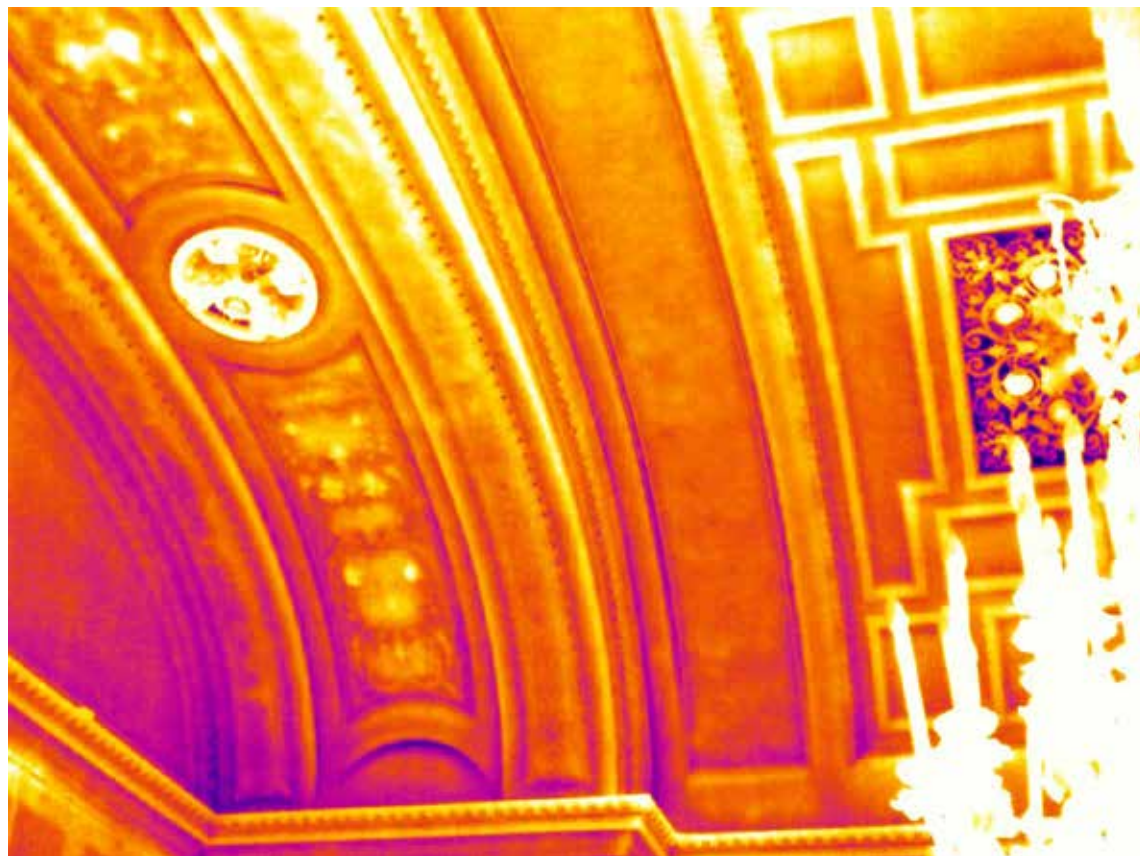
3



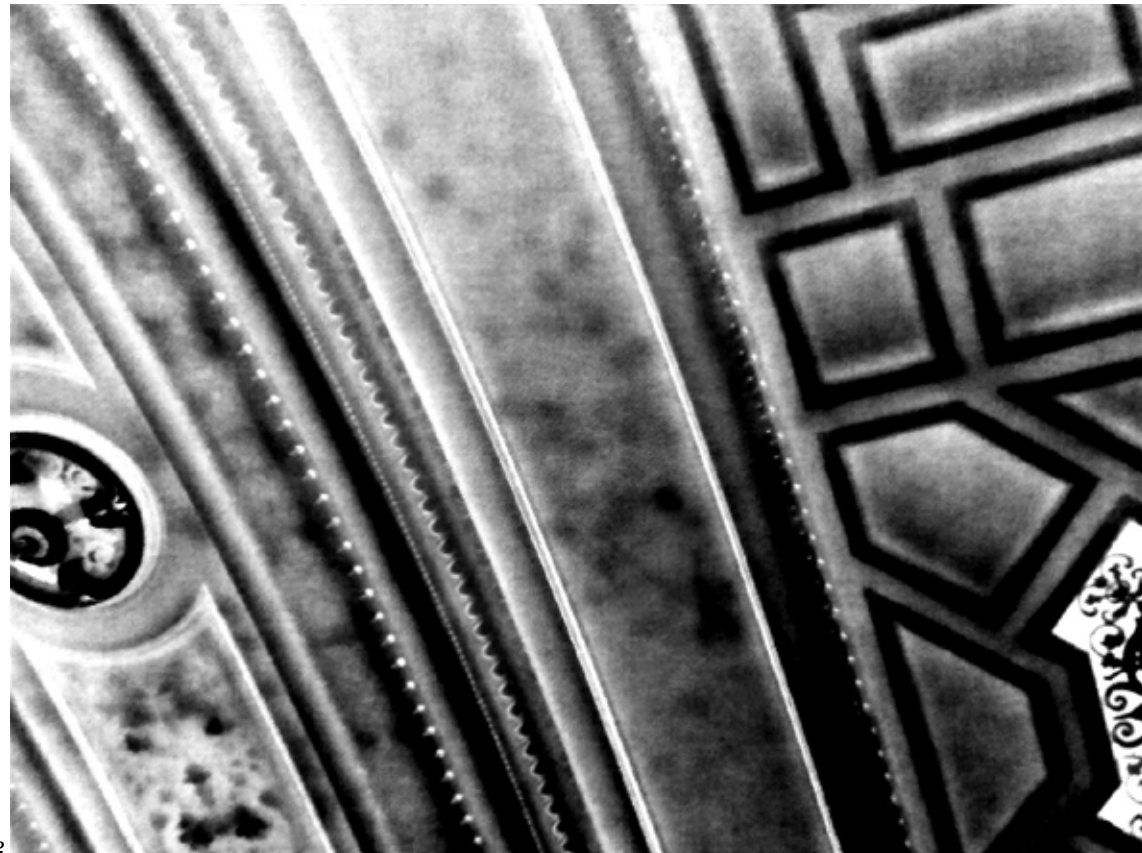
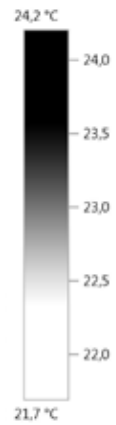
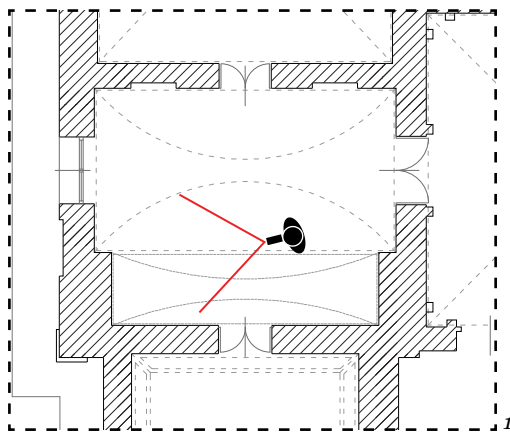
4.62. Termografia Sala Verde_4: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Questa è la prima di quattro immagini risultanti dall'osservazione dell'arco presente tra la volta a botte maggiore e quella minore.



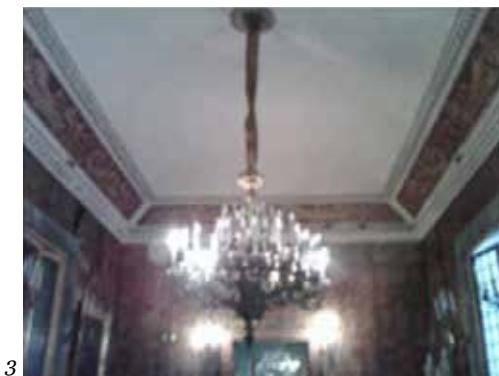
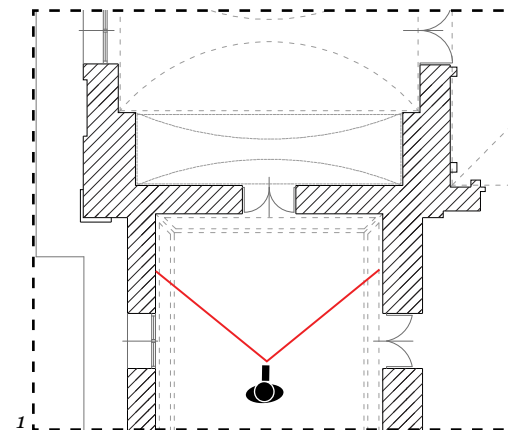
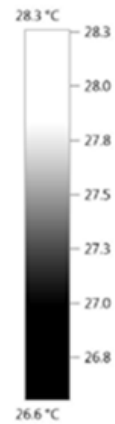
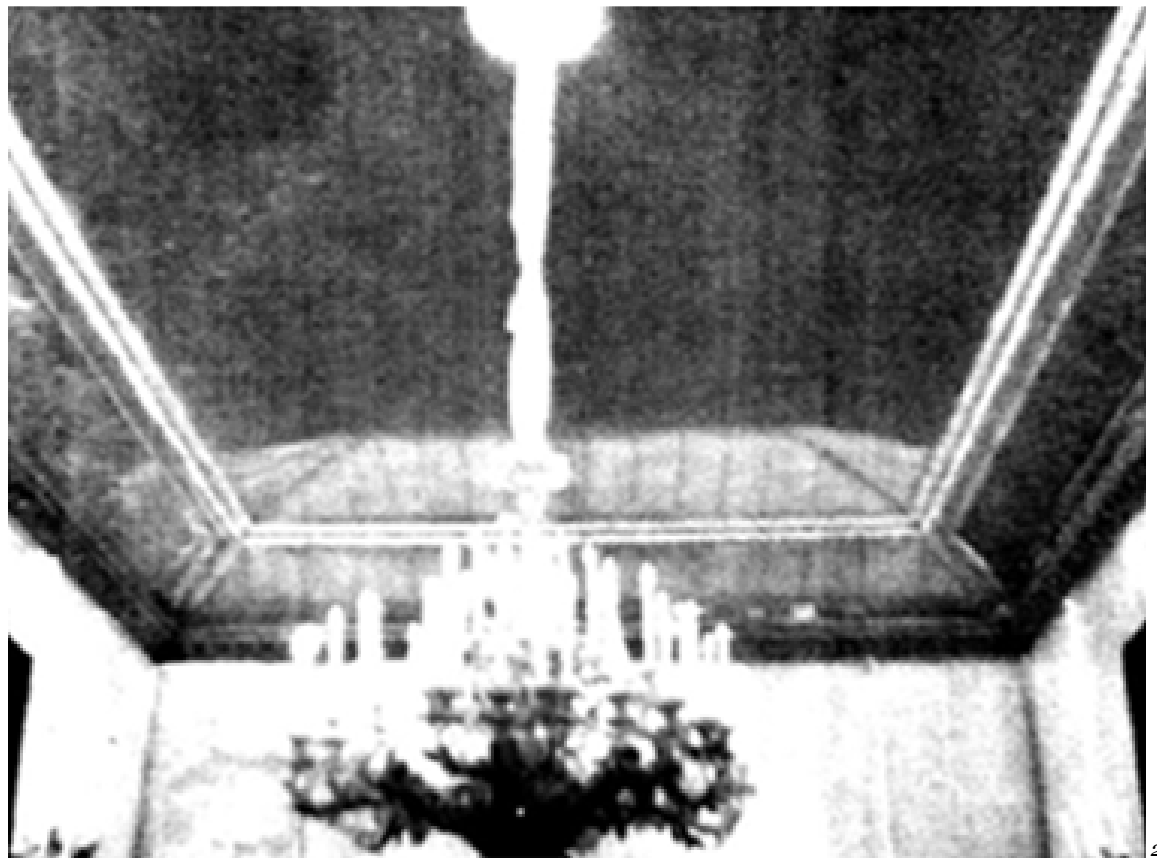
4.63. Termografia Sala Verde_5: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Questo infatti è l'unico punto dove è stato possibile intravedere una traccia di una struttura sottostante.



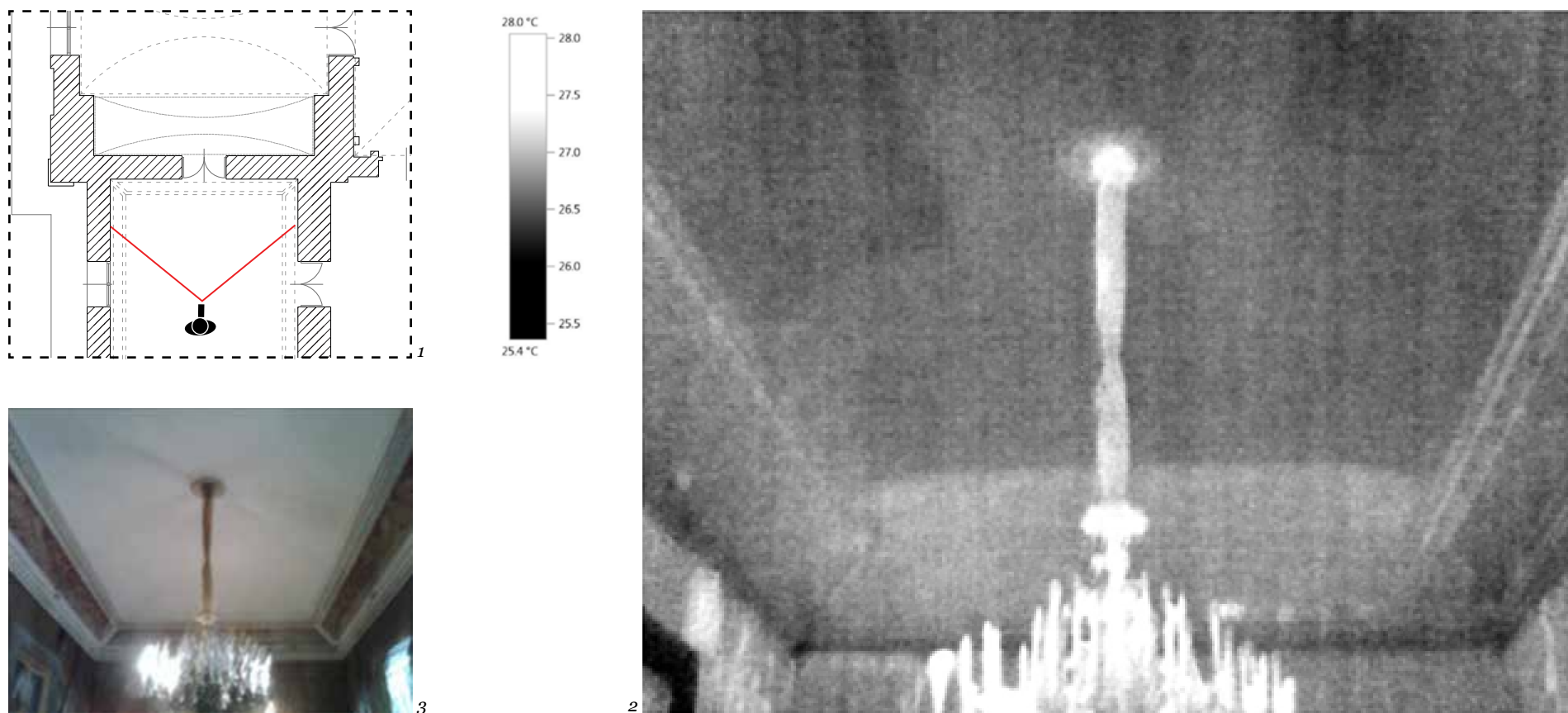
4.64. Termografia Sala Verde_6: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Sono visibili le leggere fessurazioni dovute al passaggio di un impianto nell'intradosso della volta.



4.65. Termografia Sala Verde_7: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). L'immagine in bianco e nero è quella dove le discontinuità sottostanti gli stucchi sono maggiormente evidenti.



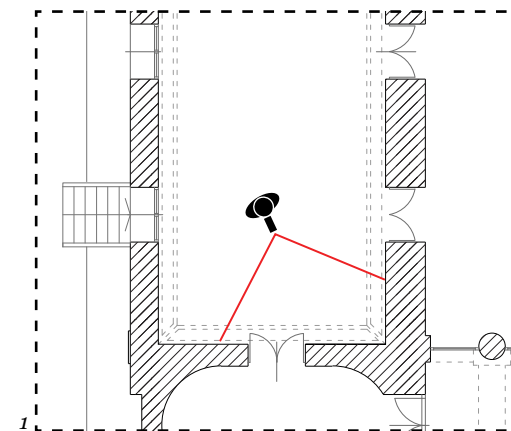
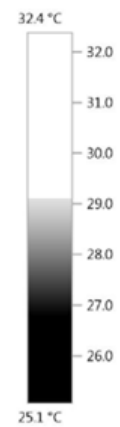
4.66. Termografia Biblioteca_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Si possono osservare chiaramente gli elementi della finta volta a schifo, con il telaio di supporto che scompare dietro allo specchio.



4.67. Termografia Biblioteca_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Lo specchio della finta volta a schifo presenta diverse disomogeneità piuttosto evidenti.



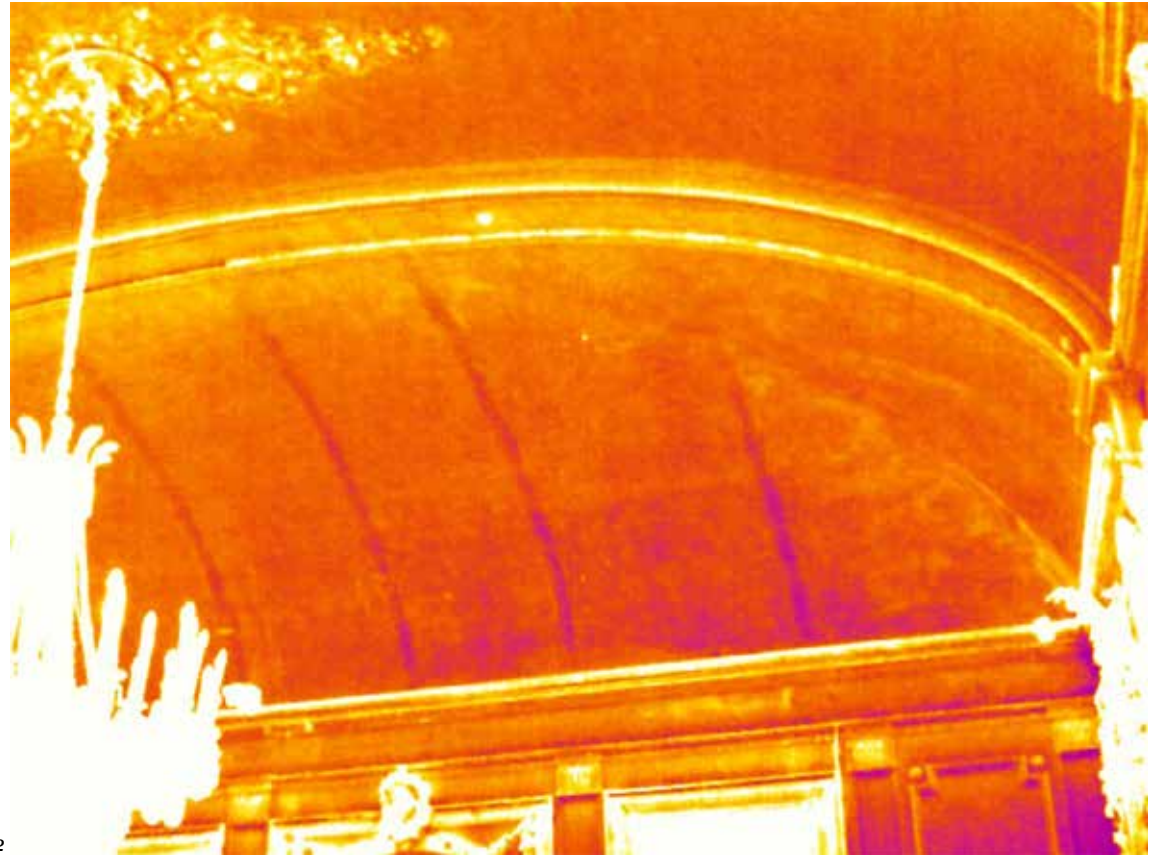
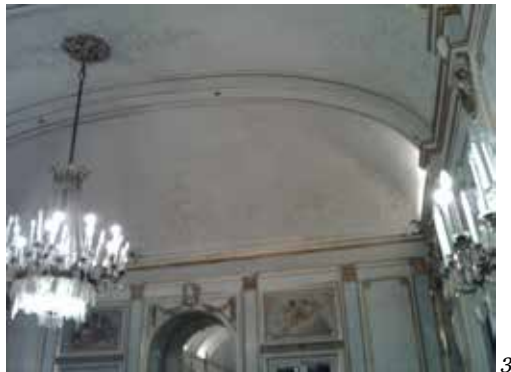
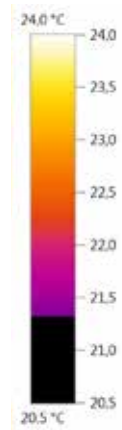
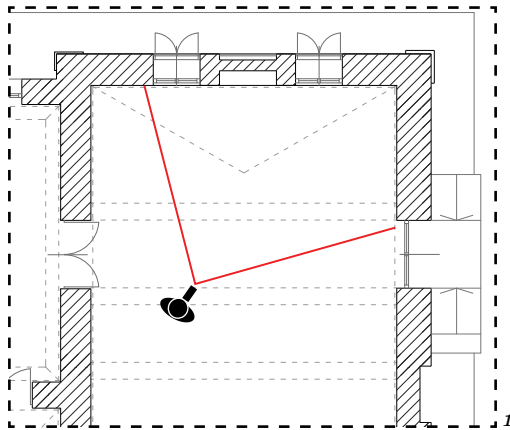
2



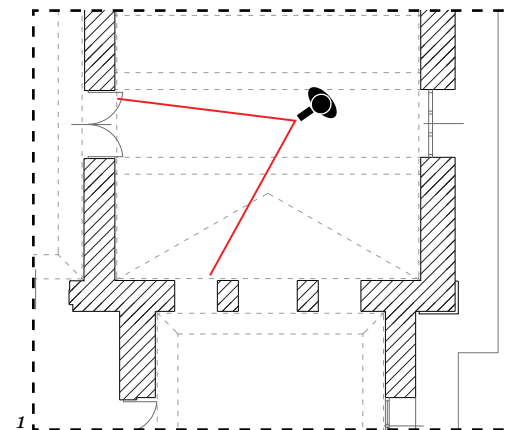
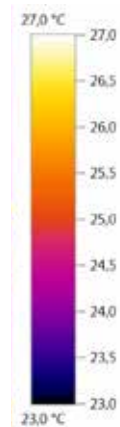
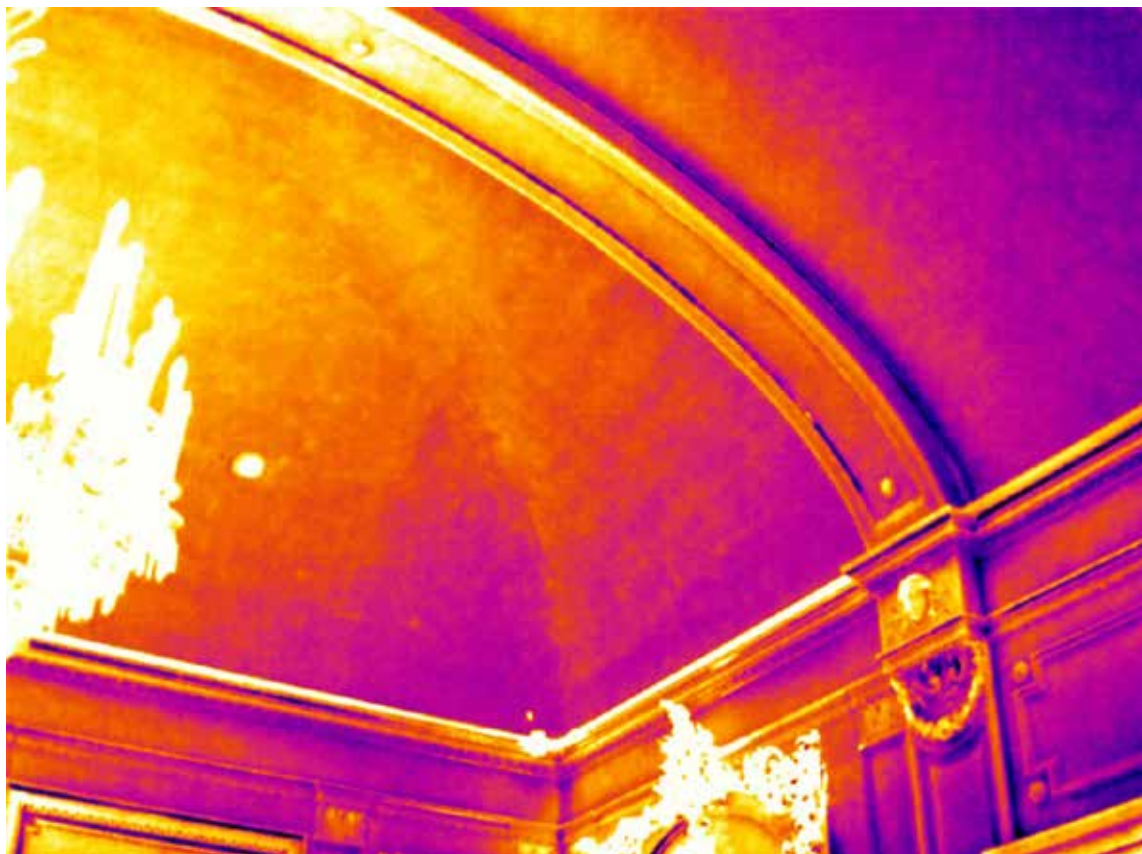
3



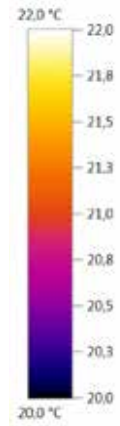
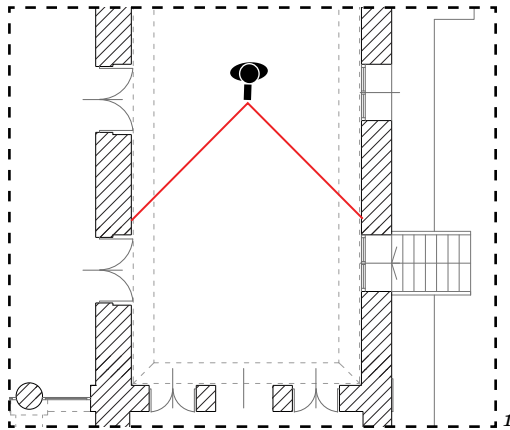
- 4.68. Termografia Biblioteca_3: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Un ingradimento del telaio di supporto della volta: si può notare il passaggio dal sistema relativo alle porzioni inclinate rispetto a quello dello specchio.



4.69. Termografia Feste Maggiore_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Il telaio di supporto alla porzione a padiglione è perfettamente leggibile, come anche la differenza tra la suddetta porzione, piuttosto disomogenea, e quella a botte, al contrario piuttosto uniforme. Questo dato potrebbe confermare la presenza di una volta strutturale a botte.



4.70. 4.69| Termografia Feste Maggiore_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3).



4.71. *Termografia Feste Minore: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Oltre al telaio di supporto allo specchio, con i suoi elementi principali longitudinali e quelli minori trasversali, si possono osservare alcuni elementi del telaio nelle parti inclinate.*

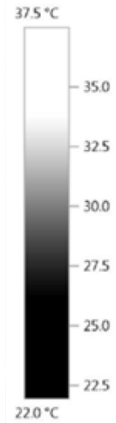
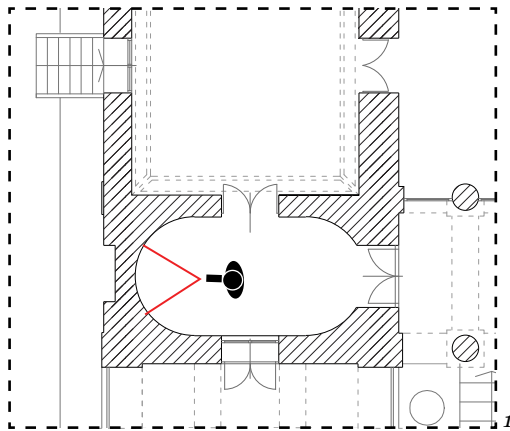
Saletta ovale

Inizialmente sono state effettuate delle indagini termografiche con riscaldamento attivo, cercando di comprendere tutta la superficie muraria e la volta. Per quanto riguarda le pareti non si sono potute ottenere informazioni fondamentali, ad esclusione del posizionamento e della tessitura dell'apertura murata nel lato ovest e alcune disomogeneità di cui non si riesce a comprendere esattamente la natura. Della volta invece è stata resa visibile la struttura di supporto, probabilmente lignea, della finta volta. Infine, puntando il visore verso l'apertura meridionale, è stato possibile individuare quella fessurazione a sviluppo verticale visibile nel rilievo fessurativo del portico sud-ovest.

Portici sud

Dei portici sud sono state esaminate tre colonne attraverso un'indagine sonica di trasparenza. Rispetto al progetto originale, si è deciso di esaminare, oltre a due colonne del portico centrale, anche una colonna del portico sud-ovest, dato che pareva possibile l'utilizzo di una differente tecnologia costruttiva per le colonne dei portici laterali. In questo caso si è deciso di non organizzare la prova su file parallele, ma su una successione verticale di sei punti distanziati 15 cm l'uno dall'altro, di cui il più basso a 60 cm dalla base del pilastro; di queste file ne è stata costruita una in funzione di una prova in direzione nord-sud e l'altra per una con direzione ovest-est.

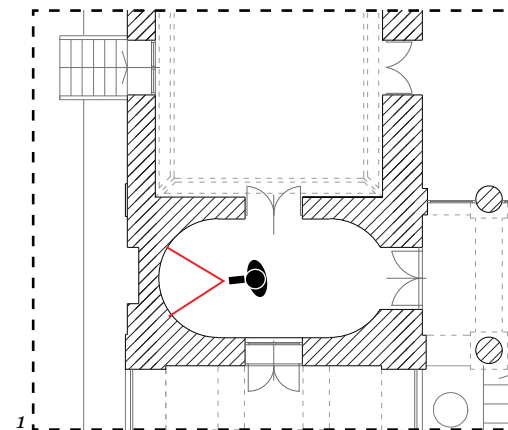
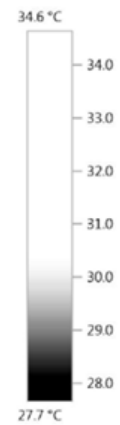
Doveroso segnalare che effettivamente i risultati hanno confermato una diversa morfologia delle colonne centrali rispetto a quelle laterali, con queste ultime che presentano velocità quasi dimezzate.



4.72. Termografia Ovale_1: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Qui l'indagine termografica ha reso visibile l'apertura inizialmente presente nel lato ovest della sala, ora murata; inoltre si può notare una fascia più scura, presente anche in altre termografie, di cui non si comprende la natura.



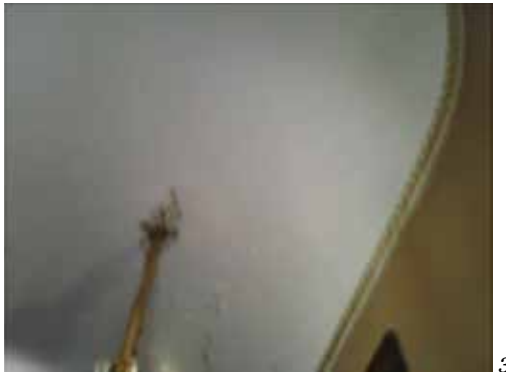
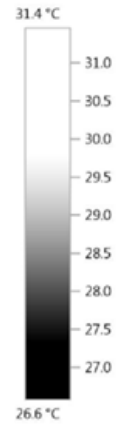
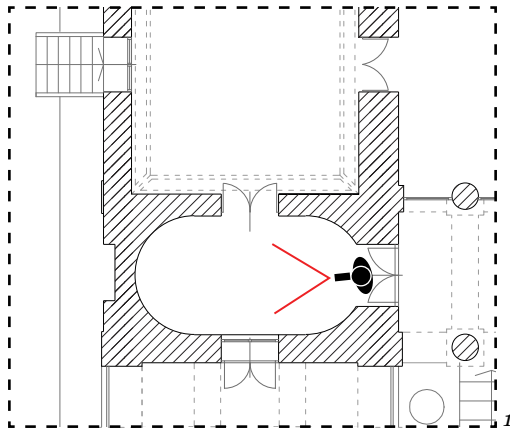
2



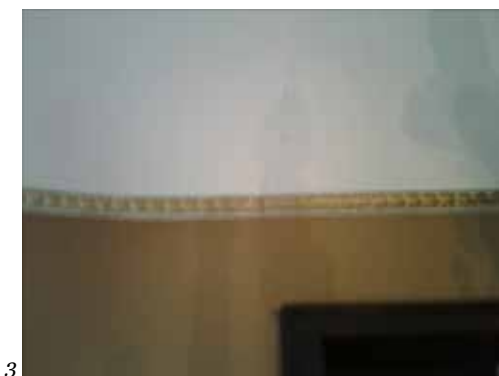
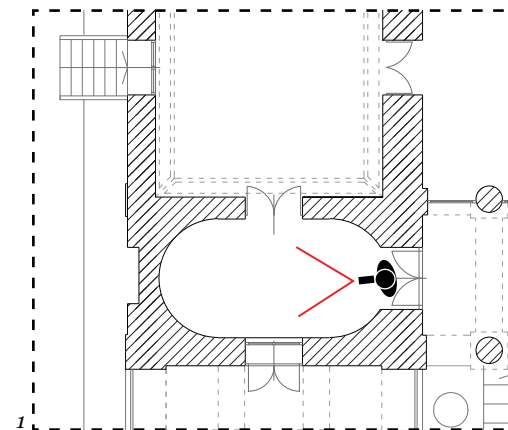
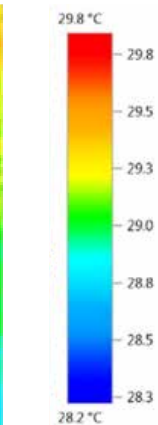
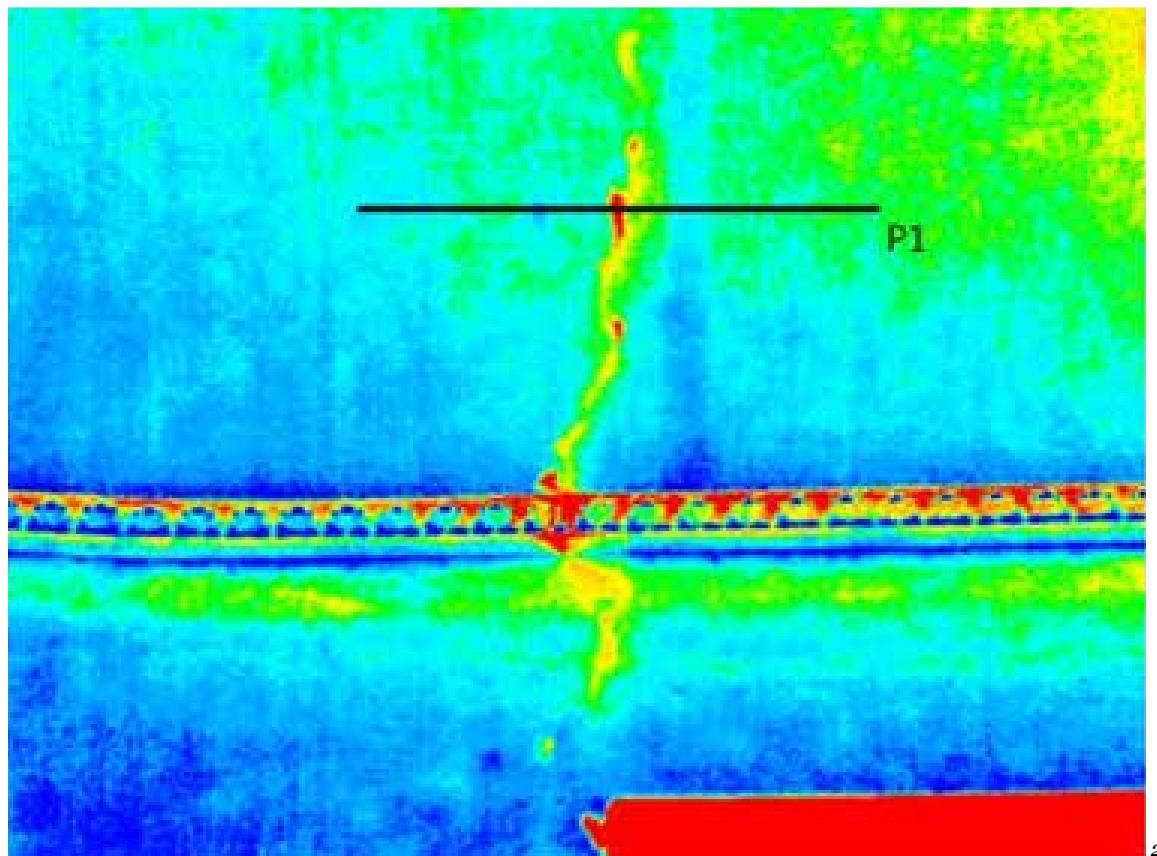
3



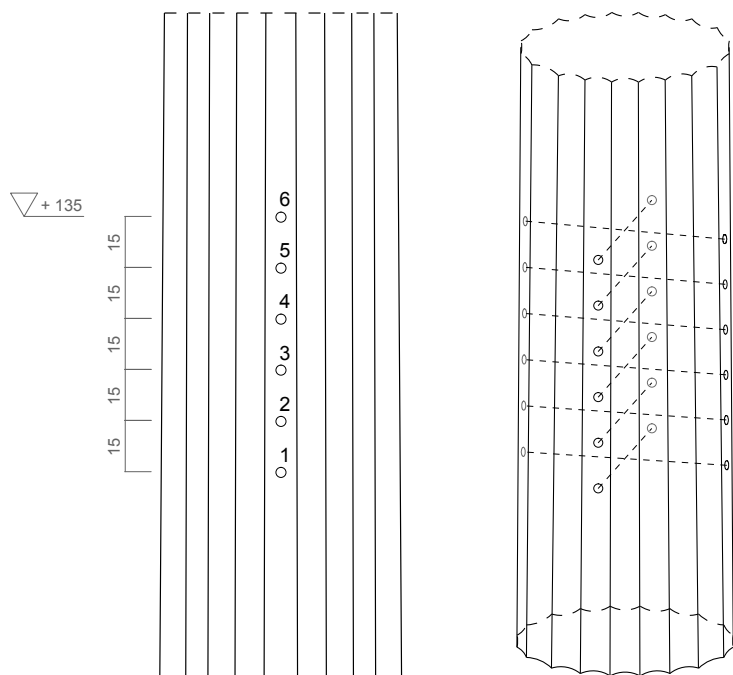
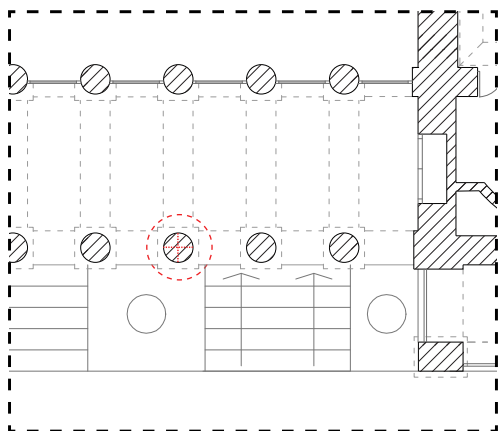
- 4.73. Termografia Ovale_2: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Una panoramica della volta presente, di cui si può notare lo schema del telaio di supporto, probabilmente ligneo.



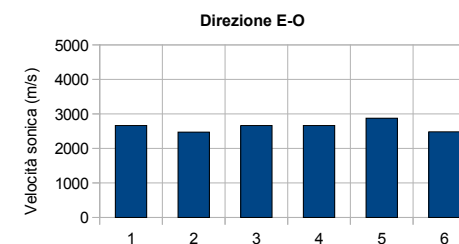
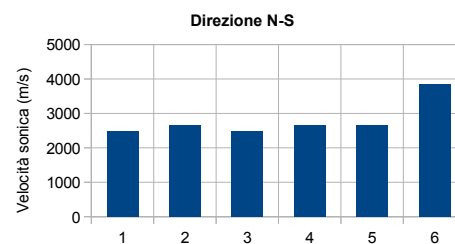
4.74. Termografia Ovale_3: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). Particolare del telaio d supporto della volta: qui, oltre agli elementi principali trasversali, si può notare un elemento longitudinale tuttavia meno marcato.



4.75. Termografia Ovale_4: punto di ripresa (1), immagine termica (2), immagine reale (3). La termografia effettuata in corrispondenza dell'apertura verso il parco ha messo in luce una fessurazione verticale. Questa, che parte dallo spigolo superiore sinistro dell'apertura e prosegue fino alla volta, trova corrispondenza nel quadro fessurativo realizzato per il portico esterno.

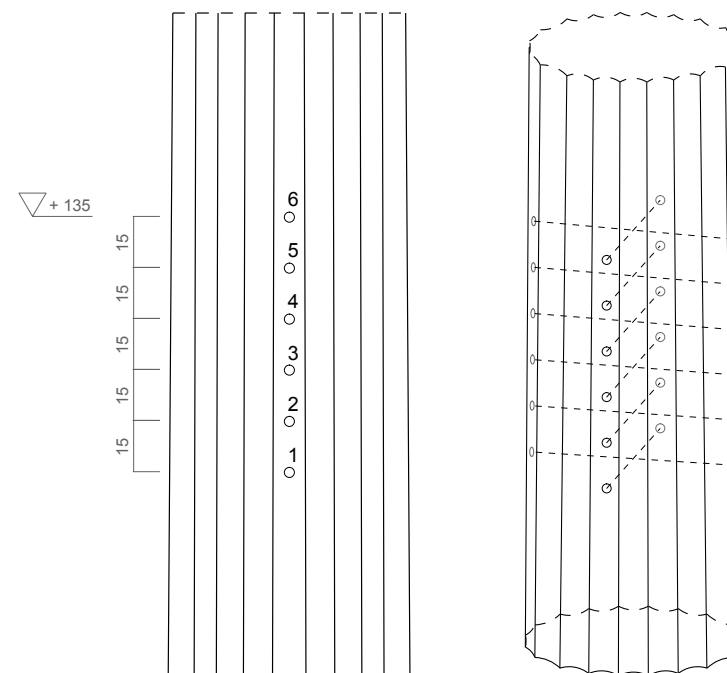
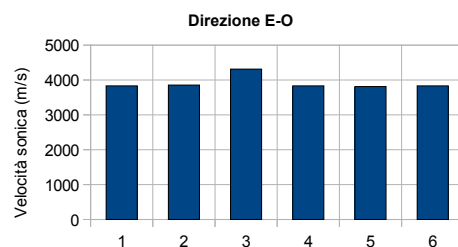
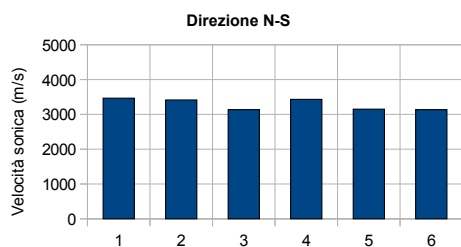
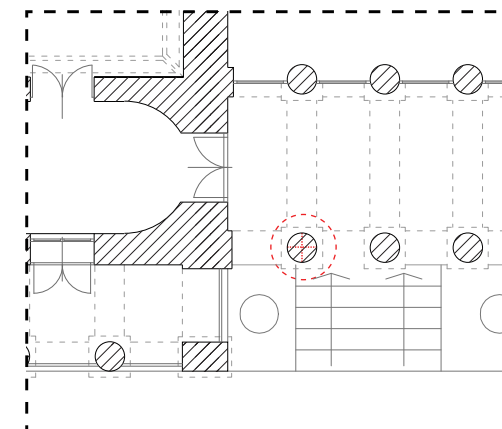


Punto di prova	Quota relativa alla base del pilastro (m)	Spessore (m)	Tempo (μ s)		Velocità (m/s)	
			Direzione		Direzione	
			N-S	E-O	N-S	E-O
1	0,60	0,69	279	259	2473	2664
2	0,75	0,69	259	279	2664	2473
3	0,90	0,69	279	259	2473	2664
4	1,05	0,69	259	259	2664	2664
5	1,20	0,69	259	240	2664	2875
6	1,35	0,69	179	278	3855	2482
Velocità minima (m/s)					2473	2473
Velocità massima (m/s)					3855	2875
Velocità media (m/s)					2799	2637
Deviazione standard (m/s)					526	148

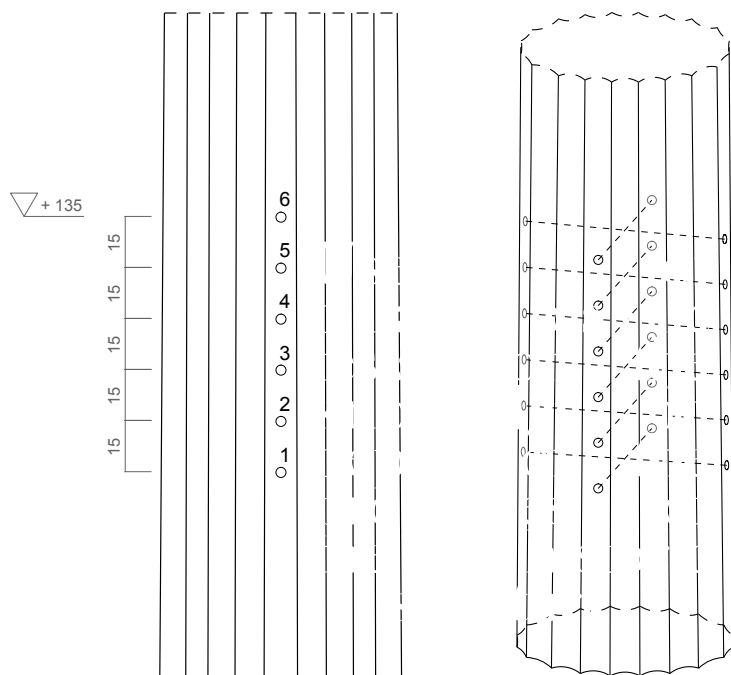
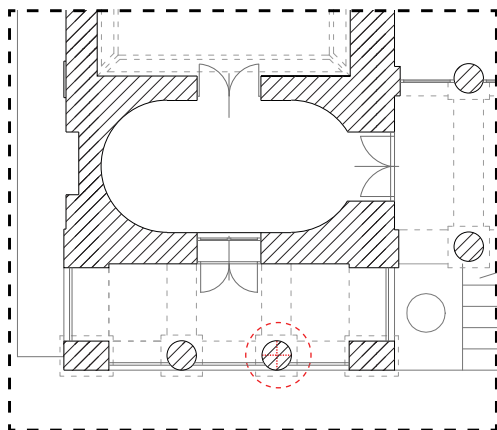


4.76. Indagine Sonica Colonna_1: a sinistra in alto la localizzazione della prova; a sinistra in basso la localizzazione dei punti rispetto alla colonna e una rappresentazione tridimensionale della porzione della colonna oggetto della prova; a destra in alto la tabella con i dati principali della prova, il tempo e la velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto, le statistiche principali; a destra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni direzione.

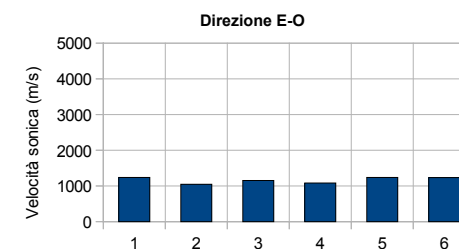
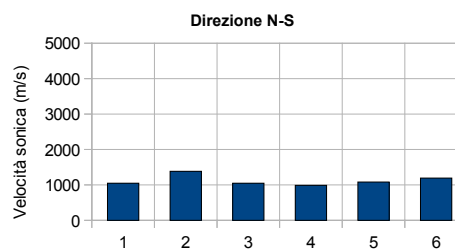
Punto di prova	Quota relativa alla base del pilastro (m)	Spessore (m)	Tempo (μ s)		Velocità (m/s)	
			Direzione		Direzione	
			N-S	E-O	N-S	E-O
1	0,60	0,69	199	180	3467	3833
2	0,75	0,69	202	179	3416	3855
3	0,90	0,69	220	160	3136	4313
4	1,05	0,69	201	180	3433	3833
5	1,20	0,69	219	181	3151	3812
6	1,35	0,69	220	180	3136	3833
Velocità minima (m/s)					3136	3812
Velocità massima (m/s)					3467	4313
Velocità media (m/s)					3290	3913
Deviazione standard (m/s)					164	196



4.77. Indagine Sonica Colonna_2: a destra in alto la localizzazione della prova; a destra in basso la localizzazione dei punti rispetto alla colonna e una rappresentazione tridimensionale della porzione della colonna oggetto della prova; a sinistra in alto la tabella con i dati principali della prova, il tempo e la velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto, le statistiche principali; a sinistra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni direzione.



Punto di prova	Quota relativa alla base del pilastro (m)	Spessore (m)	Tempo (μ s)		Velocità (m/s)	
			Direzione		Direzione	
			N-S	E-O	N-S	E-O
1	0,60	0,69	659	558	1047	1237
2	0,75	0,69	499	659	1383	1047
3	0,90	0,69	659	599	1047	1152
4	1,05	0,69	699	638	987	1082
5	1,20	0,69	639	558	1080	1237
6	1,35	0,69	579	559	1192	1234
Velocità minima (m/s)					987	1047
Velocità massima (m/s)					1383	1237
Velocità media (m/s)					1123	1165
Deviazione standard (m/s)					144	85



4.78. Indagine Sonica Colonna_3: a sinistra in alto la localizzazione della prova; a sinistra in basso la localizzazione dei punti rispetto alla colonna e una rappresentazione tridimensionale della porzione della colonna oggetto della prova; a destra in alto la tabella con i dati principali della prova, il tempo e la velocità di propagazione delle onde elastiche in ogni punto, le statistiche principali; a destra in basso i diagrammi a barre delle velocità relative a ogni direzione.

