



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile, Ambientale

Corso di Laurea Magistrale a Ciclo Unico in Ingegneria Edile-Architettura

Tesi di Laurea

Analisi strutturali per la verifica di
vulnerabilità sismica del complesso di Villa Diomede
nel sito archeologico di Pompei

Laureando: **Andrea Minello**

Matricola: 1007461

Relatore: prof.ssa **Maria Rosa Valluzzi**

Correlatori: prof. **Claudio Modena**
Ing. **Filippo Lorenzoni**

Anno accademico 2015-2016

“Tale si presentava la città di Pompei, ridente e gioconda: [...] piccolo gruppo d’abitanti che più ricercavano le gioie di una esistenza calma che non le grandi avventure; città di sorriso e di gioia, in cui il soffio ellenico, e la morbosa sottigliezza alessandrina avevano fatte fiorire delle forme elegantissime d’arte, ella si cullava nel suo sogno beato di gioia, sino a quando l’impeto bestiale della natura ha seppellito d’un colpo uomini e cose.” D.G.

Ringraziamenti

Un ringraziamento alla prof.ssa Maria Rosa Valluzzi per la professionalità nell'insegnamento e per la fiducia espressa durante le varie fasi di stesura di questo lavoro. Il contatto con il sito archeologico di Pompei e la possibilità di sviluppo di questa tesi sono stati un contributo essenziale per accrescere in me la sensibilità verso le strutture storiche e i progetti di ricerca.

Un ringraziamento anche all'ing.Filippo Lorenzoni per gli approfondimenti teorici, la disponibilità e l'appoggio durante l'elaborazione delle prove, alla prof.ssa Helene Dessales, all'ing.Elvis Cescatti, all'ing.Rita Deiana, all'ing. Giuseppina De Martino, all'ing.Athanasios Pappas e all'ing.Luca Rosato che, oltre ad aver collaborato alle analisi discusse in questa tesi, hanno condiviso le campagne di indagini di marzo e giugno 2015.

Un sentito e profondo ringraziamento a tutti quei compagni che mi hanno accompagnato durante questi 5 anni di Università per essere stati capaci di alleggerire ogni difficoltà attraverso la condivisione di esperienze, momenti e sorrisi sinceri con cui ho costruito legami oltre i limiti accademici.

Un grazie a mia sorella Jessica per la comprensione e la costante vicinanza per ciò che accomuna i nostri percorsi. Un particolare grazie ai miei genitori per aver creduto in me e avermi dato la possibilità di raggiungere tutto questo.

INDICE

Introduzione	I
1. Studio del territorio di Pompei	1
1.1 Inquadramento geografico	3
1.2 Gli scavi nel sito archeologico e il riconoscimento della città antica	3
1.3 Popoli che abitarono Pompei e primo impianto urbanistico	4
1.4 Materiali da costruzione	7
1.5 Tecniche costruttive che caratterizzano le strutture murarie della città antica	9
1.6 Tecniche di restauro utilizzate dai Pompeiani	12
2. Analisi storica critica di Villa Diomede	17
2.1 Storia, inquadramento e cronologia degli scavi	17
2.2 Rilievi ed evoluzioni	19
2.3 Relazione con lo spazio esterno: Via delle Tombe	19
2.4 I principali cantieri della Villa	21
2.5 Impatto del terremoto del 63 d.C.	23
2.6 Restauri	24
2.7 Rilievo geometrico	26
2.8 Rilievo delle tipologie murarie	29
2.9 Rilievo del danno e del degrado.....	30
2.10 Vulnerabilità	35
2.11 Inquadramento sismico	37
2.11.1 Il rischio sismico di Villa Diomede a Pompei	37
2.11.2 Storia sismica dell'area	39

3. Piano di indagini	45
3.1 Prove soniche.....	47
3.1.1 Procedura e strumentazione	47
3.1.2 Localizzazione ed esecuzione	50
3.1.3 Risultati e osservazioni	56
3.2 Prove endoscopiche	60
3.2.1 Procedura e strumentazione	60
3.2.2 Localizzazione ed esecuzione	60
3.2.3 Risultati e osservazioni	62
3.3 Prove radar	66
3.3.1 Procedura e strumentazione	66
3.3.2 Localizzazione ed esecuzione	69
3.3.3 Risultati e osservazioni	71
3.4 Prove di identificazione dinamica	76
3.4.1 Procedura e strumentazione	76
Metodi di identificazione	77
Metodi di estrazione modale	78
Procedure di acquisizione	78
Signal processing	80
3.4.2 Pianificazione della campagna di prove	83
Esigenze	83
Modello FEM preliminare	83
3.4.3 Localizzazione	85
3.4.4 Esecuzione della prova: acquisizione ed elaborazione dei dati.....	90
3.4.5 Risultati e osservazioni	94

ID_01 – Pilastro n°58	94
ID_02 – Pilastro n°48	97
Confronto ID_01 (pilastro n°58) e ID_02 (pilastro n°48)	99
ID_03 – Pilastro n°15.....	101
ID_06 – Quadriportico, lati sud e ovest separati.....	104
ID_06 – Quadriportico, lati sud e ovest	107
Confronto ID_03 con ID_06	111
ID_04 – Interno Villa, muri sud e nord separati	112
ID_04 – Interno Villa.....	117
ID_05 – Muro d’ambito est	119

4. Valutazione della sicurezza sismica 125

4.1 Normativa di riferimento	125
4.2 Caratteristiche meccaniche e analisi dei carichi	128
4.2.1 Caratteristiche meccaniche.....	128
4.2.2 Valutazione dei carichi sismici	132
4.3 Modellazione locale – analisi per macroelementi.....	138
4.3.1 Schemi generali di calcolo di meccanismo di collasso.....	138
4.3.2 Approccio cinematico	141
4.3.3 Analisi cinematica lineare	142
4.3.4 Analisi cinematica non lineare.....	144
4.3.5 Verifiche di sicurezza.....	146
4.4 Individuazione dei macroelementi.....	148
4.5 Verifiche dei macroelementi	149

Conclusioni 171

Bibliografia – Sitografia – Normativa di riferimento

Allegati

A – Schede iconografiche

B1 - Rilievo geometrico

B2 - Rilievo fotografico

B3 - Rilievo tipologie murarie

B4 - Rilievo del degrado

B5 – Quadro fessurativo

C - Schede prove soniche

INTRODUZIONE

Il lavoro di tesi ha come oggetto la valutazione della vulnerabilità sismica di una porzione di Villa Diomede e lo studio del comportamento strutturale di parti significative del complesso considerati più vulnerabili e quindi a maggior rischio di collasso in caso di fenomeni sismici.

Il manufatto, che attualmente rientra tra i beni non accessibili ai visitatori, fa parte del sito archeologico degli Scavi di Pompei ed è sottoposto alla tutela e alla conservazione del patrimonio secondo le indicazioni della Soprintendenza Speciale per Pompei, Ercolano e Stabia.

Lo studio si inserisce in un campo in cui, sono indubbiamente notevoli le quantità di documentazioni storiche, gli scritti e le pubblicazioni riguardanti il sito archeologico di Pompei, ma se si esegue una ricerca bibliografica focalizzata su Villa Diomede si percepisce che le informazioni che descrivono questa casa suburbana si presentano relativamente scarse. Spesso si ricorre alla tradizione e agli usi locali dell'epoca per ricondurre cronologicamente i vari interventi che la caratterizzano e che si sono succeduti per volere degli antichi proprietari o per ragioni urbanistiche e ambientali, compresi i fenomeni sismici. Tra i più importanti documenti si ricordano i "giornali di scavo" che interessano Villa Diomede durante gli scavi effettuati dal 1771 al 1774, gli scritti di A. Maiuri e le documentazioni fornite dal gruppo di ricerca della prof.ssa Helene Dessales dell'École normale supérieure di Parigi.

Il primo capitolo di tesi riguarderà proprio l'inquadramento di Villa Diomede nel territorio di Pompei fornendo un quadro conoscitivo dell'eterogeneità delle tecniche e materiali a cui sono sottoposte gli edifici del sito archeologico. Il capitolo, accompagnato da approfondimenti riguardanti le azioni che vennero intraprese per mettere in sicurezza le antiche costruzioni, creerà una base di conoscenza fondamentale per affrontare i capitoli seguenti.

Il secondo capitolo approfondisce quanto esposto al precedente focalizzandosi sul manufatto in esame: Villa Diomede. Partendo proprio dalla data del primo scavo si ripercorre e si riorganizzano le indicazioni riportate nei rapporti di scavo e nella bibliografia analizzata. Per la descrizione della Villa si è cercato di sfruttare ogni dato utile rendendo partecipe anche chi, visitandola nella seconda metà del Settecento, ha lasciato segni oggi interpretabili e traducibili in informazioni utili alla datazione degli interventi che vi si sono realizzati. Altro contenuto caratterizzante il capitolo è la descrizione degli ambienti effettuata attraverso una restituzione grafica delle geometrie in pianta e sezione, di un quadro fessurativo riportante i danni risultanti dall'ispezione visiva effettuata durante la prima campagna di indagine di marzo 2015 e dal rilievo delle tipologie murarie. Si è dedicato un paragrafo descrittivo alle vulnerabilità che maggiormente interessano la costruzione seguito dall'inquadramento sismico e dalla storia sismica che ha incrociato la vita del manufatto.

Villa Diomede rientra nei progetti di fruibilità che nei prossimi anni si cercherà di portare a termine negli Scavi di Pompei: nota l'estrema importanza per la tutela e la salvaguardia del bene culturale e per permettere a chiunque di godere di un simile patrimonio storico è fondamentale incrementare la conoscenza dello stesso. A tal fine, le indagini strumentali realizzate durante la seconda campagna di giugno 2015 risultano un ottimo supporto e caratterizzano il corposo terzo capitolo di tesi. È doveroso sottolineare, per questo tipo di costruzioni, l'importanza dell'applicazione di procedure sperimentali di tipo non distruttivo che si traduce nell'impiego di metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura.

Le qualità dei materiali di Villa Diomede sono state analizzate sfruttando i risultati ottenuti da prove soniche dirette e tomografiche su murature e pilastri campioni con l'obiettivo di confrontare qualitativamente i diversi paramenti e suggerendo informazioni utili, nelle successive fasi di analisi strutturali locali, quale la qualità del nucleo interno delle murature che modificheranno gli indici riguardanti i fattori di confidenza. Sfruttando cavità e fessurazioni presenti negli elementi della Villa, si è fatto uso di un endoscopio in grado di restituire fotografie e video di parti non visibili ad occhio nudo per confermare o meno quanto ottenuto dalle prove soniche.

Sono state effettuate anche delle indagini Georadar su alcuni degli ambienti interni ed esterni alla Villa, sulla base delle indicazioni storico-archeologiche fornite a priori, allo scopo di validare ed arricchire di ulteriori elementi le ipotesi di trasformazione e di modifica della struttura che hanno interessato la Villa nelle differenti fasi.

I progressi nel campo informatico ed elettronico degli ultimi decenni e il loro carattere non invasivo fanno sì che le prove di identificazione dinamica vengano sfruttate anche per le strutture storiche. Per le analisi sul rischio sismico è fondamentale l'identificazione dei parametri modali delle strutture che descrivono il comportamento dinamico della struttura dipendente proprio dalle sue caratteristiche intrinseche. Tra questi anche il grado di vincolo è importante e l'identificazione dinamica eseguita a Villa Diomede suggerirà le probabili anomalie tra gli elementi strutturali e il grado di collaborazione delle stesse, necessarie per quanto sarà esposto al capitolo 4.

Inoltre, tra il contenuto dello stesso capitolo potranno leggersi le principali procedure, i principi, la strumentazione, la localizzazione su cui si basano le indagini e le osservazioni dei risultati ottenuti.

Le dimensioni della Villa e la sua particolarità di organizzazione in struttura e spazi ha portato a concentrare le analisi di vulnerabilità in una porzione e non nella sua completezza, ricordando comunque che le porzioni individuate possono ritenersi indipendenti. Le analisi, sulla base delle indicazioni messe a disposizione dalle normative in vigore, cioè le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 con le relative istruzioni per l'applicazione contenute nella Circolare del 2009 e le Linee

Guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, definiscono il quarto e ultimo capitolo. Con l'ausilio delle prove svolte si è svolta un'analisi per macroelementi, adottando meccanismi cinematici fuori piano e compiendo la verifica allo SLV (Stato Limite di salvaguardia della Vita) con analisi "lineare" e, nel caso in cui questa non sia verificata, con analisi "non lineare". Le ultime righe del presente documento forniscono, quindi, indicazione degli elementi a maggior rischio di collasso in caso di fenomeni sismici che può essere sfruttato come primo approccio per la progettazione degli interventi, passo importante per conseguire quanto proposto nelle prime righe di questa introduzione ossia la tutela, la conservazione e la fruibilità di un patrimonio storico unico al mondo riconosciuto, talvolta, "Patrimonio Culturale dell'Umanità" (UNESCO) e di cui Villa Diomede a Pompei ne gode l'appartenenza.

Capitolo 1

Studio del territorio di Pompei

1. Studio del territorio di Pompei

1.1 Inquadramento geografico

Pompei, confinante con le limitrofe cittadine di Boscoreale, Scafati, Torre Annunziata, Castellammare di Stabia e S. Maria la Carità è una città appartenente alla provincia napoletana, a breve distanza dalle coste del Golfo di Napoli. Sorge su un altopiano di formazione vulcanica nell'Italia meridionale, sul versante sud del Vesuvio, a circa 14 metri sul livello del mare ed a breve distanza dalla foce del fiume Sarno.

È conosciuta a livello mondiale soprattutto per la presenza di un vasto patrimonio archeologico e unico al mondo in grado di richiamare milioni di visitatori per il fascino e l'estensione del sito archeologico. È proprio a questo patrimonio e in particolare a Villa Diomede che verrà fatto riferimento nei prossimi capitoli, un approccio dedicato alla valutazione del rischio sismico cui è sottoposta l'antica costruzione (fig.1.1).



Figura 1.1 - Immagine satellitare e localizzazione della Città di Pompei. [Google Earth]

1.2 Gli scavi nel sito archeologico e il riconoscimento della città antica

La città antica, fondata dagli Osci Campani nel VII sec. a.C.¹, fu un importante snodo commerciale, inizialmente greco, poi etrusco, successivamente sannita e romano. Fin dai primi anni di scavi, le evoluzioni storiche che ha subito l'antica Pompei e le analisi dei materiali utilizzati nelle costruzioni nelle diverse epoche, dall'osca all'imperiale, sono state argomento principale per archeologi e studiosi per molti anni e abbracciano non solo le costruzioni ma i dipinti, gli stili e gli oggetti dell'epoca.

Le numerose pubblicazioni diffuse in Italia e in Europa testimoniano l'impegno che ancora oggi si dedica all'antica città per comprenderne le evoluzioni subite in termini urbanistici, artistici e culturali.

Gli albori di ogni interesse, assicurati dalla stupefacente conservazione di memorie contenute nel sito archeologico, iniziò il 28 marzo 1748 e terminò il 26 settembre 1750: Re Carlo III autorizzò gli scavi a Pompei ma furono condotti senza alcun metodo con esplorazioni sporadiche e disorganiche in vari

¹ L'Italia Monumentale. Collezione di monografie sotto il patronato della Dante Alighieri e del Touring Club Italiano (1917), *Pompei*, Milano, P. Bonomi Editore, pp.5-6

punti dell'area e gli oggetti che vi si trovarono furono destinati semplicemente all'arricchimento del museo partenopeo.²

Quattro anni dopo il termine di questa prima campagna la costruzione di una strada mise in luce alcune tombe e le ricerche ripresero per non essere, salvo i brevi intervalli, mai abbandonate³.

Solo il 20 agosto 1763, durante lo scavo della necropoli di Porta Ercolano, la scoperta di una iscrizione portante il nome della città "Respublica Pompeianorum" permise di riconoscere le antichità come appartenenti a Pompei.

1.3 Popoli che abitarono Pompei e primo impianto urbanistico

Secondo una ricostruzione diffusa all'inizio del Novecento, la "città vecchia" di Pompei, fondata sul finire del VII secolo a.C., si sarebbe estesa su poco più di 9 ettari e avrebbe compreso solo le zone del Foro Civile e del Foro Triangolare, dove furono costruiti i due più antichi templi della città, dedicati rispettivamente ad Apollo e a Minerva, il primo di tipo etrusco-italico su alto podio, il secondo invece costruito secondo i canoni dell'architettura greca dell'epoca (fig.1.2). Il segno più evidente dell'antichità di questo primitivo nucleo sarebbe stato ancora identificabile nella rete viaria curvilinea d'età romana che limita questa parte di Pompei.⁴

L'egemonia greca sulla costa campana venne però ben presto minacciata dall'avanzare prepotente di una nuova potenza che conquistò Pompei: quella degli Etruschi. Contemporaneamente si dovette assistere ad una lenta ma inarrestabile discesa delle popolazioni sannitiche provenienti dalle zone montane.

La discontinuità fra la Pompei arcaica e quella del primo periodo sannitico è evidente nel tessuto stesso della città: nessuno degli edifici visibili o scoperti nel corso degli scavi può essere datato al V secolo a.C.⁵, è solo con la fine del secolo successivo che si nota una rilevante ripresa di attività edilizie.

² Interessante è il fatto dell'arch. Fontana che nel 1594-1600 attraversò Pompei nella sua maggior lunghezza con un canale destinato a portar le acque del Sarno a Torre Annunziata, scoprendo numerose case ed una iscrizione "decurio Pompeis", senza rendersi conto del valore della sua scoperta.

³ L'Italia Monumentale. Collezione di monografie sotto il patronato della Dante Alighieri e del Touring Club Italiano (1917), *Pompei*, Milano, P. Bonomi Editore, pp.5-6

⁴ Pesando F. (2012), *Pompei, le età di Pompei*, Milano, 24 Ore Cultura srl

⁵ Pesando F. (2012), *Pompei, le età di Pompei*, Milano, 24 Ore Cultura srl



Figura 1.2 – A sinistra: il podio del Tempio di Apollo [www.wikipedia.it]. A destra: Pompei fra il VI e il V secolo a.C.: il Foro Civile e il cosiddetto Foro Triangolare. La lettera A indica l'area del culto di Apollo adiacente al Foro [F. Pesando, Pompei, le età di Pompei]

Osservando la pianta di Pompei si è subito colpiti dal fatto che le isole dei diversi Regi si presentano di grandezza e forma diversa: le irregolarità a sud del Foro contrastano la regolarità dovuta alle vie rettilinee che si incrociano ad angolo retto nella parte orientale dello stesso Foro. Le forme varie e irregolari delle regioni VII e VIII possono essere il lontano riflesso di un primitivo centro indigeno (fig.1.3).



Figura 1.3 - Pianta di Pompei: si nota il contrasto tra la regolarità delle strade a oriente e le irregolarità in prossimità del Foro Triangolare [www.images.treccani.it]

La forte influenza che gli etruschi ebbero nella trasformazione di Pompei è documentata anche dal confronto con la pianta della colonia etrusca a Marzabotto: le strade presentano il medesimo sistema di costruzione delle strade di Pompei. Inoltre nella colonia a Marzabotto i sepolcri si trovavano in ciascuna estremità della via cardinale e delle vie decumane, appena fuori le porte. Similmente, a Pompei non solo i sepolcri sannitici, ma anche i romani mantengono la medesima disposizione topografica.

In secondo luogo, di tutti i templi di Pompei, i maggiori e i più antichi hanno il fronte rivolto a mezzogiorno, orientazione propria dei templi etruschi. Quindi, sia per i dati monumentali, sia per una nota testimonianza di Strabone, sembra certo che il piano regolatore sia stato applicato a Pompei dagli Etruschi, ma si potrebbe anche supporre che lo stesso piano fosse stato applicato dai greci che si sarebbero stabiliti circa nel VI sec. a.C. nella piccola città del Sarno ma contro tali ipotesi sta il fatto inoppugnabile che tutta la tradizione edilizia di Pompei, dal tempio alla casa, non è greca ma etrusca. Nemmeno gli avanzi del tempio dorico possono accertare che l'applicazione del piano regolatore fosse greca, essendo stato dimostrato chiaramente in successivi studi che la sua presenza piuttosto che attestare la presenza di coloni greci, rivela niente altro che un puro e semplice influsso greco.

Gli etruschi quindi, una volta preso il possesso dell'abitato osco, fondarono la nuova città con il sistema



Figura 1.4 - Le mura ad agger presso Porta Nocera [F. Pesando, Pompei, le età di Pompei]

della "limitazione" creando due grandi arterie che si intersecano ad angolo retto, il cardo massimo e il decumano massimo.⁶

Verso la metà del V secolo a.C. Pompei venne conquistata dai Sanniti, e nel 308 a.C., due anni dopo aver subito la devastazione del proprio territorio a opera dei Romani, le città della Valle del Sarno stipulano un trattato di alleanza con Roma⁷.

L'ingresso di Pompei tra le città federate con i Romani coincide con una intensa attività edilizia che si riflette soprattutto con la costruzione di un nuovo circuito murario, edificato con il sistema ad agger utilizzato anche a Roma (fig.1.4).

È da questo momento, cioè dagli anni iniziali del III secolo, che inizia a svilupparsi la Pompei che tutti conosciamo, con le sue strade⁸, i

suoi edifici pubblici e le sue abitazioni, interventi che portarono alla bellezza e al benessere della città attribuendo al II secolo a.C. la definizione di "secolo d'oro": intorno al 100 a.C.⁹ gli isolati delle abitazioni si estendono su quasi tutta la superficie della città, riempiendo anche il periferico quartiere sud-orientale.

Parte di questo mondo cessò di esistere a partire dalle guerre sociali del 91 a.C. In questi anni Pompei fu ostile a Roma ma fu impossibile resistere alla sua forza militare: nell'89 a.C. Silla, dopo aver fatto

⁶ Sogliano A. (1937), *Pompei preromana dalle origini all'80 a.C.*, Pompei nel suo sviluppo storico vol 1, Roma, Società Editrice "Athenaeum".

⁷ Tali fatti, narrati secoli dopo da Livio, costituiscono la prima testimonianza storica su Pompei.

⁸ Precedentemente le strade erano battute, vennero sostituiti dai basolati solo tra l'età tardo-repubblicana e quella imperiale.

⁹ Resti di case databili a questo periodo sono infatti emersi anche al di sotto dell'anfiteatro, costruito intorno al 70 a.C.

capitolare Stabia, partì alla volta di Pompei che tentò di difendersi rinforzando le mura cittadine. Ogni tentativo di resistenza risultò vano e ben presto la città cadde.

Nell'80 a.C. entrò definitivamente nell'orbita di Roma e Silla vi trasferì un gruppo di veterani nella "Colonia Venerea Pompeianorum Sillana". Le grandi proprietà agrarie dei Pompeiani, dove sorsero le prime ville di residenza e di produzione, furono confiscate e spartite fra i nuovi arrivati cancellandone la memoria stessa degli antichi proprietari attraverso la rimozione dei monumenti sepolcrali.¹⁰

Le fonti sono piuttosto avare di notizie sulla vita di Pompei nella prima età imperiale. Solo Tacito ricorda la rissa tra Nucerni e Pompeiani del 59 d.C. nell'anfiteatro di Pompei che spinse i consoli a proibire per dieci anni ogni forma di spettacolo gladiatorio.

1.4 Materiali da costruzione

Individuate le diverse epoche che hanno caratterizzato la storia della città antica, si vogliono ora mettere in evidenza i materiali utilizzati nelle strutture murarie per creare un quadro conoscitivo delle strutture verticali e degli elementi che la compongono e che ancora oggi risultano perfettamente visibili nell'intero sito archeologico.

Come suggerisce A. Sogliano in "Pompei nel suo sviluppo storico. Pompei Preromana" bisogna sottolineare la forte influenza che la lava del Vesuvius (Monte Somma), costituente il colle di Pompei, aveva nei confronti degli antichi costruttori.

Le colate erano coperte esternamente da un manto di scoria, rapprese rapidamente e in maniera vitrea. "Il magna sottoposto alla scoria, lentamente rappreso e compatto è più povero di cavità; questa è la lava nel senso proprio della parola"¹¹, successivamente la scoria si trasforma in spuma di lava detta anche cruma e forma così la superficie della colata. Si è voluta fare questa breve precisazione perché spesso, nel descrivere gli edifici pompeiani, il termine "lava" viene utilizzato non per indicare la pietra solida ma la scoria e la cruma. L'accento ai fenomeni legati ai materiali vulcanici giustifica la presenza di questo materiale tra le murature di Pompei, il prevalere della scoria nelle pareti delle case non deve sorprendere; lo strato superiore dell'intero colle, composto proprio da questo materiale era inadatto ad ospitare le fondazioni degli edifici, si doveva raggiungere la pietra solida rimuovendo lo strato poco resistente, guadagnando una notevole quantità di materiale che poteva essere utilizzato per la costruzione delle pareti. Nei muri di cinta invece si utilizzava più frequentemente blocchi di lava compatta.

Oltre a lava e cruma, un altro importante materiale da costruzione a Pompei è il tufo che si distingue in tufo giallo e tufo bigio. Il tufo giallo è il più antico prodotto dei vulcani locali, viene anche chiamato pietra di Napoli per la sua presenza nelle vicinanze della città. Il tufo bigio è un materiale della zona montuosa da Nocera a Sorrento, infatti prende nome proprio da queste due città, pietra di Nocera e pietra di

¹⁰ Pesando F. (2012), *Pompei, le età di Pompei*, Milano, 24 Ore Cultura srl

¹¹ Sogliano A. (1937), *Pompei nel suo sviluppo storico. Pompei preromana*, Roma, Società Editrice "Athenaeum", pag.48

Capitolo 1

Sorrento. Anche la valle del Sarno, da dove si ricavava il calcare di Sarno, era un serbatoio di materiale per le case di Pompei. L'assenza di grandi campi argillosi nei dintorni della città faceva sì che i mattoni non fossero cotti di pura argilla ma caratterizzati piuttosto dalla pozzolana dei campi Flegrei.

I pompeiani quindi per la costruzione dei loro edifici utilizzarono materiali che avevano comodamente a disposizione e facilmente lavorabili: scoria, calcare e tufo. Soltanto per le fondazioni o per le strutture destinate a sopportare grandi pesi utilizzavano la pietra solida, compatta.

I vari studi che si sono susseguiti in merito ai materiali ed al riconoscimento cronologico dell'uso di questi è stato effettuato soprattutto da Fiorelli che attribuisce al calcare di Sarno la precedenza sul tufo di Nocera¹². Questa distinzione cronologica però non può ritenersi fondamentale nell'edilizia e architettura pompeiana e non può assumersi come assoluto criterio cronologico¹³ trovandosi la lava, il calcare sarnese e il tufo utilizzati alternativamente uno prima dell'altro, o viceversa, o contemporaneamente.

Una parte di esperti, invece, sostiene che l'uso di un determinato materiale rappresenta un indice per la datazione dell'edificio e individuano cinque epoche:

- Epoca pre-sannita (VI-V secolo a.C.) con l'uso prevalente del calcare di Sarno nell'opus reticulatum;
- Prima epoca sannita (IV-III secolo a.C.) nella quale venivano adoperati il calcare di Sarno e materiali vulcanici nell'opus quadratum per i muri perimetrali e nell'opus incertum per i muri interni;
- Seconda epoca sannita (200-90 a.C.) in cui prevale l'impiego del tufo;
- Inizio colonizzazione romana (90 a.C.- 14 d.C.) con l'uso frequente dell'opus reticulatum.
- Epoca romana imperiale (14-79 d.C.) in cui le costruzioni erano realizzate con l'opus mixtum con "quadrelli" di tufo e filari di mattoni. L'impiego del mattone era molto frequente anche per costruzione degli spigoli e le costruzioni completamente eseguite in laterizio erano destinate ad essere rivestite in pietra o marmo.¹⁴

Nell'ultima fase edilizia di Pompei vengono utilizzati materiali e tecniche già noti durante i precedenti periodi cioè: l'opera cementizia, l'opera incerta, l'opera reticolata, l'opera isodomica o tufacea, l'opera laterizia e l'opera mista. La preferenza dell'uno o dell'altro tipo erano dettati soprattutto da ragioni di partica opportunità: il terremoto del 63d.C. fece crollare numerose costruzioni e da questi crolli e demolizioni si otteneva il materiale per nuovi edifici o sistemazione di quelli danneggiati.

¹² Sogliano A. (1937), *Pompei nel suo sviluppo storico. Pompei preromana*, Roma, Società Editrice "Athenaeum", pag.53

¹³ Sogliano A. (1937), *Pompei nel suo sviluppo storico. Pompei preromana*, Roma, Società Editrice "Athenaeum", pag.53

¹⁴ Maiuri A. (1935), *Pompei, Itinéraires des musées et monuments de l'Italie*, Roma, Libreria dello Stato, pp 9-10.

1.5 Tecniche costruttive che caratterizzano le strutture murarie della città antica

Opus caementicium

Come nei periodi precedenti all'ultima fase di Pompei, l'opera a sacco continuò ad essere sia una struttura di ossatura con un nucleo centrale per le murature sia una struttura di fondazione. Generalmente il nucleo era costituito dagli stessi materiali che formavano il paramento: scaglie calcaree, tufo, cruma.

Per le opere di fondazione, invece, l'opera cementizia si presentava in due forme, una ottenuta con il sistema a getto versando il materiale composto da lava e calcare all'interno della cassaforma costituita da due paratie in legno, l'altra ottenuta a getto libero direttamente nello scavo di fondazione prevalentemente composto di lava vulcanica dura.

Nei due diversi tipi di fondazione i caementa erano legati e quasi sommersi in un letto di malta.¹⁵

Opus incertum

Fu la struttura fondamentale di tutta l'edilizia pompeiana e anche nell'ultimo periodo continuò il suo predominio come testimoniato dal suo utilizzo per i rifacimenti parziali o totali dei muri perimetrali.

Nel corso degli anni però questa tecnica subì delle variazioni e degli adattamenti che la resero facilmente distinguibile dalle strutture analoghe dei precedenti periodi, sia per il collegamento alle altre strutture, sia per la qualità della calce. Nei primi periodi generalmente l'opera incerta fu inquadrata da pilastri e "angolate" in opera laterizia, successivamente la stabilità delle strutture non fu più soltanto affidata alla bontà del materiale e della malta ma si aggiunse un sistema di concatenamento realizzato con un materiale più duro e meno deformabile come il mattone.¹⁶ Il muro in opus incertum comunque continuò ad essere a sacco, formato da un'ossatura interna in opus caementicium costituita da un conglomerato di materiali più o meno informi e promiscui.¹⁷

In molti casi la malta utilizzata coprì buona parte della superficie della pietra di paramento; per quanto riguarda i materiali, oltre alla presenza di molti materiali di recupero provenienti dalle demolizioni vennero spesso utilizzati il calcare sannese e la lava vulcanica, si utilizzò meno la cruma, il tufo giallo e il tufo di Nocera (fig.1.5).

¹⁵ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani.

¹⁶ Questo sistema non era propriamente nuovo nella storia dell'edilizia pompeiana, nelle strutture sannitiche dell'età calcarea l'unione di listoni verticali e orizzontali con l'opera incerta di quel primitivo periodo è sostanzialmente basata sullo stesso principio di elementi verticali e orizzontali di sostegno e collegamento.

¹⁷ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, p.193.

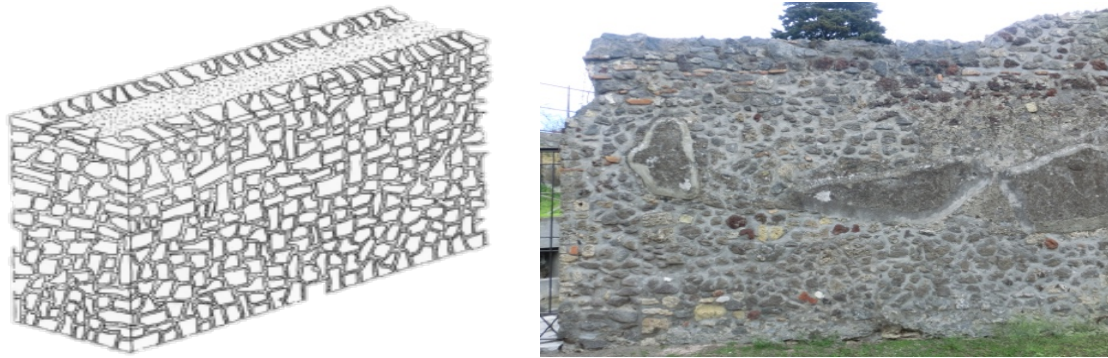


Figura 1.5 - Schematizzazione di opus incertum [www.cw.routledge.com] e fotografia

Opus reticulatum

L'opera reticolata ebbe grande applicazione nell'ultima fase edilizia combinando elementi policromi dati dalle varie qualità di tufo tale da lasciare la facciata a "facciavista" senza intonaco di rivestimento. Questa tecnica costruttiva venne utilizzata sia per i muri maestri sia per le pareti interne, le quali appaiono realizzate interamente in opus reticulatum oppure limitatamente a specchi centrali.

Anche in questo caso la struttura risulta composta da un nucleo interno a sacco, ricavato generalmente dai residui stessi delle lavorazioni dei materiali che variano dal tufo nocerino al tufo giallo di varia colorazione, alla pietra di calcare sarnese, alla cruma di lava e al cotto (fig.1.6).

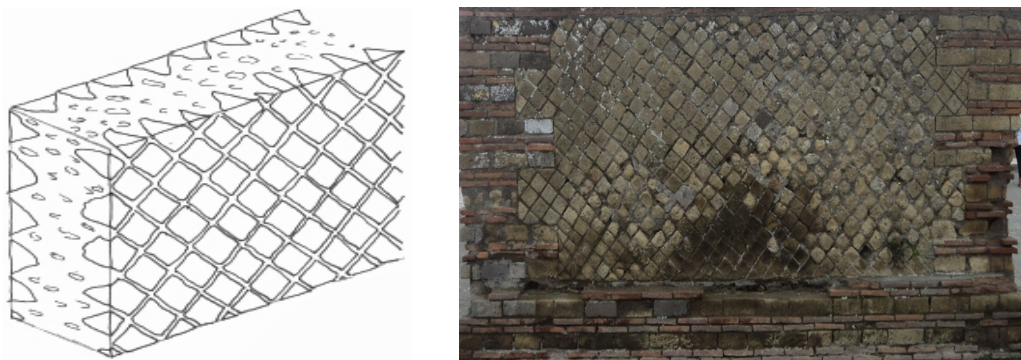


Figura 1.6 - Esempio di opus reticulatum [www.cw.routledge.com] e fotografia

Opus latericium (o testaceum)

Insieme all'opus mixtum contrassegnò nel modo più evidente l'ultima fase edilizia di Pompei, usata soprattutto nelle opere di restauro, nella ricostruzione di muri, pilastri e colonne danneggiati dal terremoto del 63d.C.

La struttura risulta anche qui costituita da un nucleo interno a sacco racchiuso tra due paramenti di facciata costituiti da materiali in cotto prevalentemente mattoni ricavati dalle tegole di copertura.

Le costruzioni così realizzate godono di una forte precisione che è possibile osservare nei singoli elementi strutturali tagliati tutti della stessa misura e nei giunti di malta che vennero fatti corrispondere alternativamente alle stesse linee verticali dalla base alla sommità del pilastro (fig.1.7).

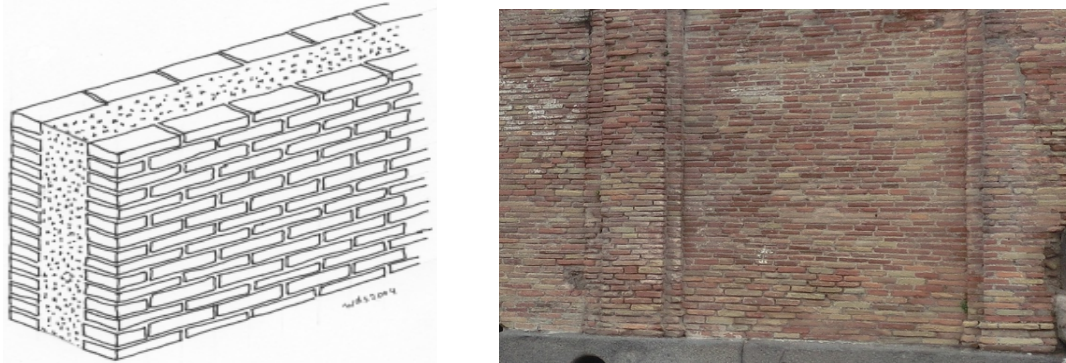


Figura 1.7 - Esempio di opus latericium [www.cw.routledge.com]

Opus mixtum

Come l'opera laterizia, anche questa struttura a filari alternati di conci di pietre e mattoni, venne utilizzata nell'ultima fase edilizia di Pompei soprattutto per le opere di rifacimento delle murature danneggiate. Presenta un nucleo interno costituito prevalentemente da materiali di tufo o calcare con pochi residui di elementi in cotto; il paramento di facciata era composto generalmente da ricorsi in mattoni ricavati quasi sempre da tegole, alternati a conci di tufo prevalentemente giallo, più raramente di tufo nocerino o di calcare; ad un filare di conci si alternarono non soltanto un filare di mattoni ma anche due o tre (fig.1.8).

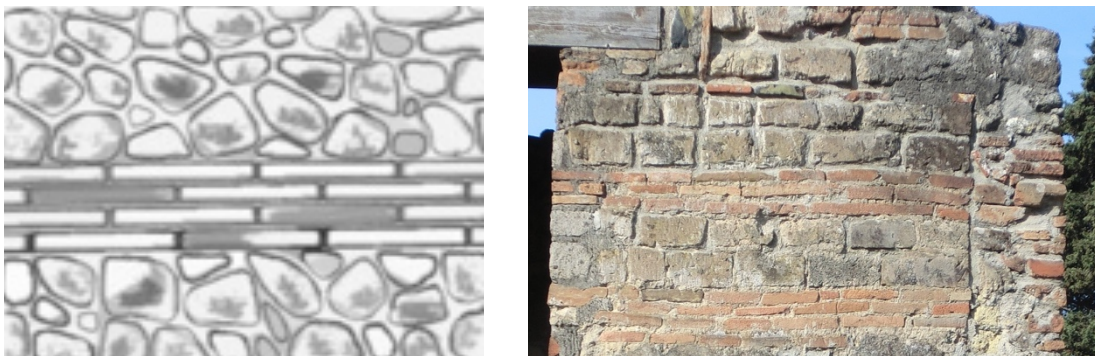


Figura 1.8 - Esempio di opus mixtum [www.tankonyvtar.hu]

1.6 Tecniche di restauro utilizzate dai Pompeiani

Nell'esame delle strutture antiche di un edificio non si può prescindere, per una precisa datazione, dai restauri o dai rifacimenti che furono portati a termine nei sedici anni che trascorsero tra il terremoto del 63 d.C. e il 79 d.C., data dell'eruzione. Ancora oggi, al riconoscimento di questi restauri è legata la storia edilizia controversa di qualche monumento pubblico della città.

Nei capitoli precedenti si è accennato ai materiali utilizzati per questo tipo di interventi ma altrettanto interessante rimangono i sistemi e le tecniche che i costruttori pompeiani usarono per riparare i danni prodotti dal terremoto.

Sarcitura delle lesioni

Particolarmente diffuso è la sarcitura delle lesioni: si trattava di ricucire e di ricollegare tutte le parti strutturali che subirono lesioni senza che si fosse innescato un crollo o "gravi strapiombi".¹⁸ Vennero comunemente realizzate in opera laterizia mista di tufi e laterizi, o anche in opera reticolata a seconda della disponibilità del materiale (fig.1.9).

Catene di concatenamento

In presenza di distacchi, lesioni o cedimenti si realizzavano delle catene di concatenamento per ricollegare le testate dei muri partimentali ai muri maestri, questa catena comprendeva l'intera altezza della parete e comunemente era tutta in opera laterizia, raramente si realizzarono in opera mista.

In questo periodo entrarono nella comune norma dell'arte del costruire anche le fasce orizzontali che, inserite a intervalli regolari nelle strutture in opera incerta o reticolata e collegate generalmente con i pilastri angolari, formarono delle vere e proprie catene di robustamento, collegamento tra gli elementi verticali e di concatenamento dell'intera struttura.

Archi di scarico

Anche l'arco di scarico, sebbene appaia nei periodi precedenti al terremoto, trova la sua maggiore applicazione nell'ultima fase della città, in funzione di robustamento e di scarico si posiziona al di sopra dei vani d'ingresso e delle edicole dei principali edifici pubblici costruiti o ricostruiti fra il 63 e il 79 d.C (fig.1.9-1.10).

¹⁸ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, p.203.

Pilastrini di robustamento

Si tratta di opere di robustamento identificati come pilastrini di rinforzo in opera laterizia in aggiunta a quelli in opera quadrata in calcare e tufo. Un esempio è proprio nella Villa di Diomede in cui “si trovano quattro barbacani addossati al muro esterno del giardino del lato d'occidente” (fig.1.10-1.11).¹⁹

Rinzeppature di colonne

Singularissimo fra tutte le tecniche di restauro, fu quello della rinzeppatura delle colonne mediante colatura di piombo liquido alla base del fusto per ricostruirne il tronco e riportarlo alle condizioni di poter resistere alla pressione del carico derivante dalle coperture (fig.1.11).

Restauro degli intonaci

In tutto questo, anche gli intonaci vennero restaurati tramite un semplice abbozzo dell'intonaco con stucco bianco levigato e “leggermente attintato”.²⁰

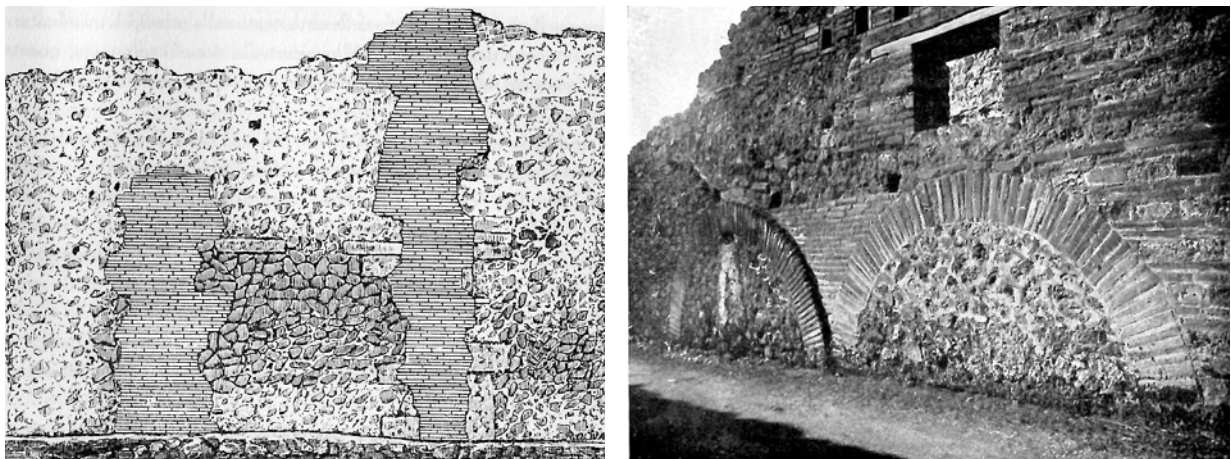


Figura 1.9 – Esempio di sarcitura, casa del Criptoportico (a sinistra) e di archi rovesci (a destra). [A.Maiuri, l'ultima fase edilizia di Pompei.]

¹⁹ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani., p.207.

²⁰ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani., p.207.



Figura 1.10 – Esempio di archi rovesci (a sinistra) e di pilastri di robustamento (a destra). [A.Maiuri, l'ultima fase edilizia di Pompei.]

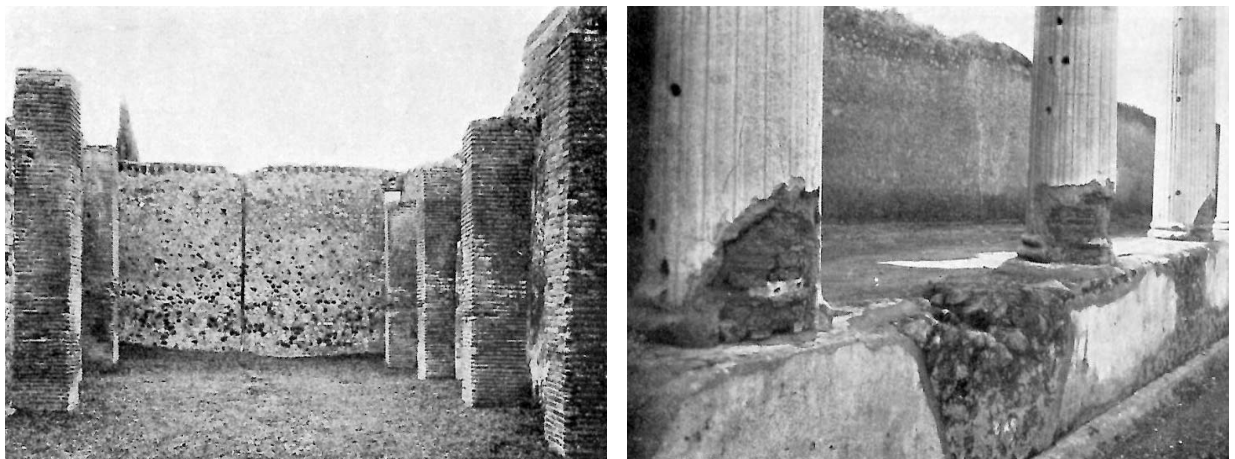


Figura 1.11 - Esempio di pilastri di robustamento (a sinistra) e di rinzeppatura di colonne (a destra). [A.Maiuri, l'ultima fase edilizia di Pompei.]

Capitolo 2

Analisi storico-critica di Villa Diomede

2. Analisi storica critica di Villa Diomede

2.1 Storia, inquadramento e cronologia degli scavi

Scavata negli anni 1771-1774 Villa Diomede è uno dei primi edifici scoperti a Pompei. Grazie alla sua posizione strategica all'accesso di Porta Ercolano, alla vastità delle sue vestige e alla qualità eccezionale dei suoi decori, la villa costituì una delle tappe privilegiate del Gran Tour, un lungo viaggio nell'Europa continentale effettuato dai ricchi giovani dell'aristocrazia europea a partire dal XVII secolo e destinato a perfezionare il loro sapere con partenza e arrivo in una stessa città. Questo viaggio poteva durare da pochi mesi fino a svariati anni. Lo svolgersi del viaggio e la comune destinazione finale era l'Italia²¹ con Villa Diomede inserita tra le tappe fondamentali della classica visita a Pompei proposta ai viaggiatori con due centri di interesse principale: da una parte la locazione di una ventina di vittime dell'eruzione immobilizzati nel criptoportico, dall'altra parte la visita del complesso termale, uno dei primi conosciuti nel contesto privato del mondo romano.

Le scritte che i viaggiatori lasciarono sui muri durante queste visite hanno permesso di studiare le caratteristiche del turismo pompeiano, in particolare la popolarità della Villa e le origini dei viaggiatori.

Luogo di memoria inevitabile evocato in molte descrizioni di viaggiatori, la Villa è stata oggetto di svariate rappresentazioni da parte di artisti e architetti dalla fine del XVIII secolo fino a i nostri giorni.²²

L'ampiezza di questo grande cantiere privato suburbano rappresenta uno dei più grandi cantieri di costruzione della colonia e può essere paragonato ai grandi cantieri pubblici.

Francesco la Vega, direttore degli scavi del sito dal 1764 al 1807, vegliò a produrre una documentazione di grande precisione sullo sviluppo e sul processo degli scavi, e, cosciente dell'inevitabile degrado dei decori rimasti in situ, ne fece produrre delle copie da parte di vari artisti. Il suo progetto, che non riuscì a portare a termine, aveva l'obiettivo di presentare una pubblicazione completa riguardante la Villa.

Grazie ai giornali di scavo riportati da G. Fiorelli sui volumi "Pompeianorum Antiquitatum Historia" (PAH)²³ è possibile seguire il percorso di scavo dei vari livelli della villa nei suoi 5 anni di scavo. Il documento riporta con grande precisione lo stato dei resti e la descrizione degli oggetti identificati.

Inoltre sono stati trascritti i settori che individuano gli spazi della villa.²⁴

Le figure 2.1 e 2.2 indicano il percorso effettuato durante gli anni di scavi.

²¹ https://it.wikipedia.org/wiki/Grand_Tour

²² Villa Diomede è al centro del racconto fantastico di Thèophile Gautier, *Arria Marcella*, pubblicato 1882.

²³ Fiorelli G. (1860-64), *Pompeianorum Antiquitatum Historia*, Napoli.

²⁴ Dessales H et al (2015), "Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2014", *Cronique des activités archéologiques de l'Ecole française de Rom*.

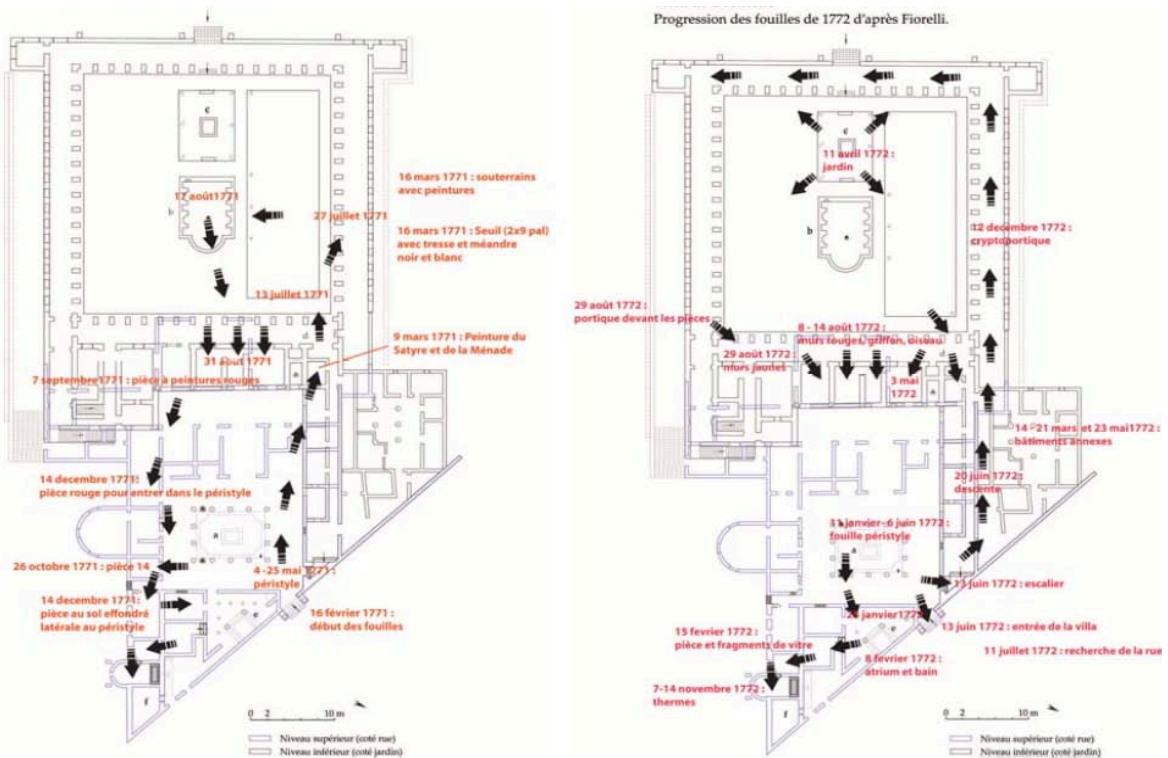


Figura 2.1 - Progressione degli scavi del 1771 e 1772. [Dessales H. et al (2014)., "Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2013.]

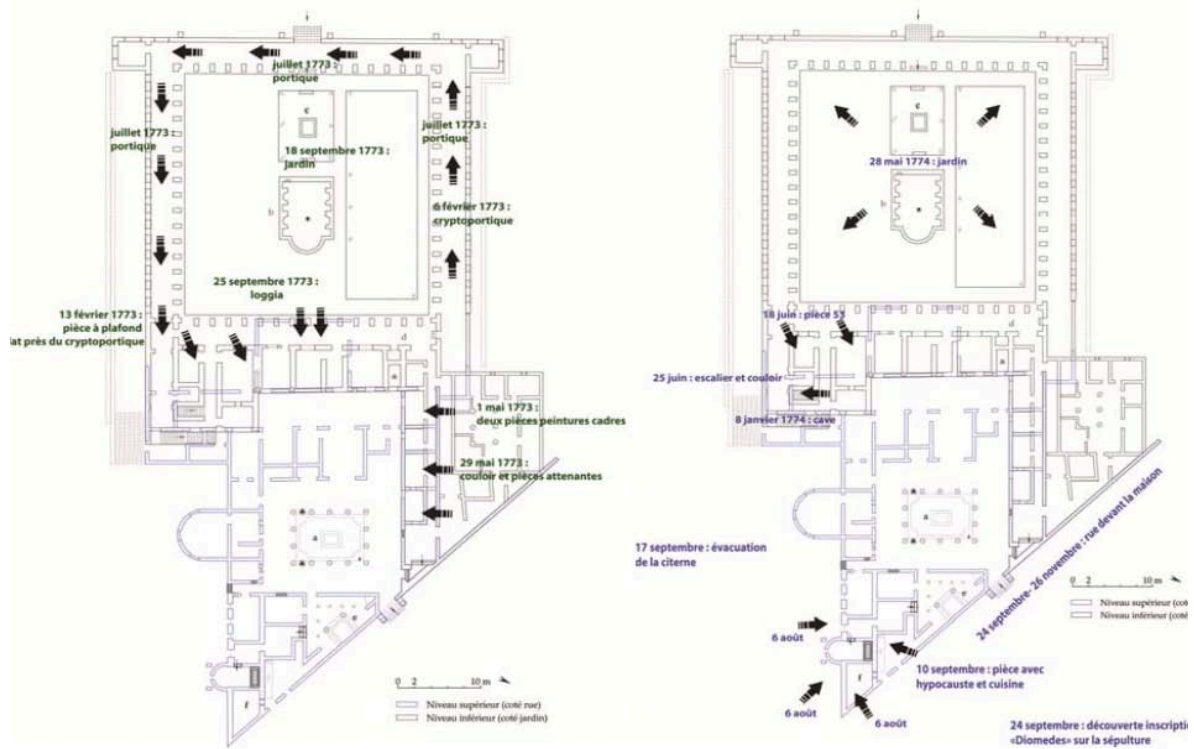


Figura 2.2 – Progressione degli scavi del 1773 e 1774. [Dessales H. et al (2014)., "Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2013.]

2.2 Rilievi ed evoluzioni

I primi rilievi architettonici di Villa Diomede sono stati effettuati da Mazois e poi da Jvanoff ²⁵.

La lussuosa abitazione è caratterizzata da una storia evolutiva di non facile interpretazione, i diversi materiali e i diversi tipi di costruzione, accompagnati dai restauri moderni creano una forte eterogeneità che rendono difficoltoso l'individuazione e la stesura di una cronologia di interventi in essa effettuati.

Nei prossimi capitoli, al fine di una restituzione grafica coerente, la numerazione degli ambienti e delle murature si riferisce alle piante dello stato attuale con la suddivisione in tre livelli: piano terra, piano giardino, quadriportico (fig.2.3). Le numerazioni coincidono con quelle utilizzate dal gruppo di ricerca guidato da Helene Dessales, direttore del progetto di Villa Diomede.

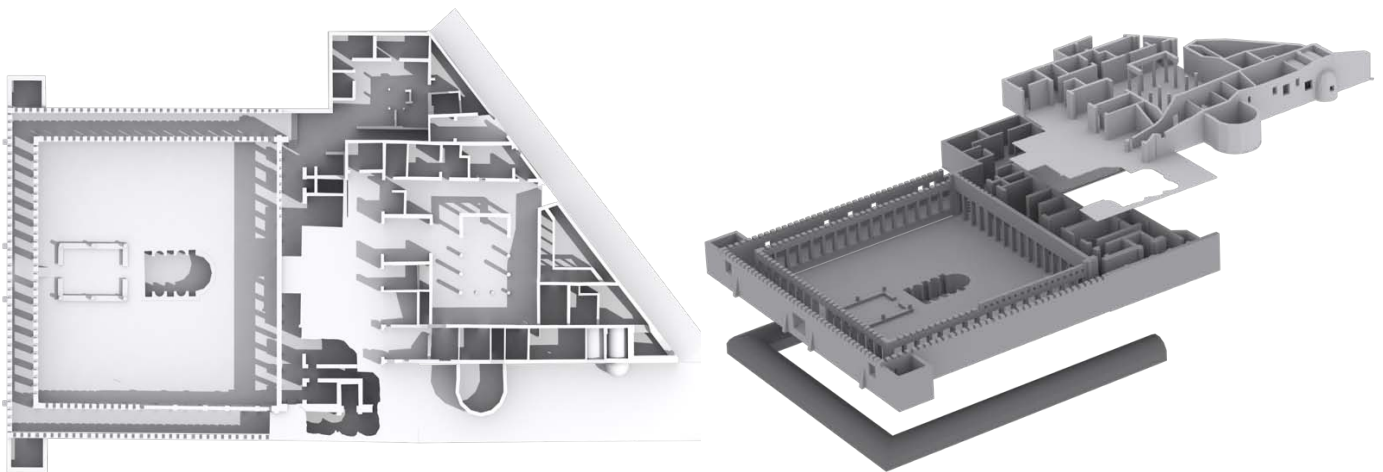


Figura 2.3 – Modello tridimensionale di Villa Diomede e scomposizione dei tre livelli.

2.3 Relazione con lo spazio esterno: Via delle Tombe

È di fondamentale importanza tenere conto dello sviluppo urbano di Pompei che negli anni interessò la zona suburbana della antica città; dall'analisi delle disposizioni e delle forme degli ambienti della pianta del piano terra è possibile notare lo stretto legame che questa costruzione assume con la strada detta "Via delle Tombe". Una osservazione presente negli scritti di Maiuri e in un articolo di Mingazzini²⁶, evidenzia come le tre ville di Diomede, di Cicerone e dei Misteri, abbiano lo stesso allineamento che non corrisponde

²⁵ A. Maiuri, *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, 1942, p.157.

²⁶ Dessales H et al (2015), "*Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2014*", *Cronique des activités archéologiques de l'Ecole française de Rome*

a quello di Via delle Tombe e che nel 79d.C. serviva le tre ville: da una prima interpretazione sembra chiaro che l'asse viario abbia privato la Villa Diomede della sua parte anteriore (fig.2.4).

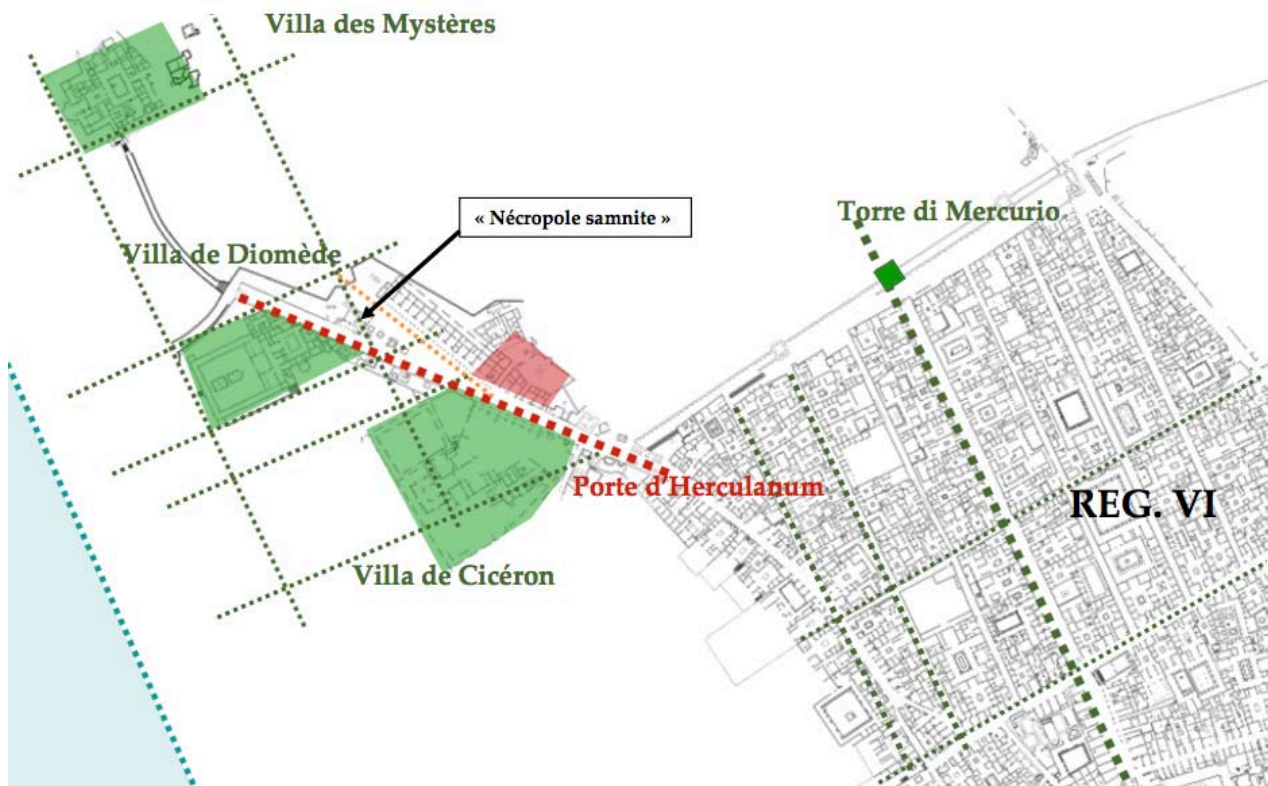


Figura 2.4 - Studio degli allineamenti delle tre Ville e il piano urbano di Pompei. [Dessales H. et al (2014) "Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2013]

Gli studi condotti dal gruppo di ricerca guidato da Helene Dessalles ha permesso di effettuare tre ipotesi in merito al legame tra la Villa e la strada.

Una prima ipotesi è quella dell'accesso diretto al peristilio, è una teoria presente negli scritti del XIX secolo, infatti F. Mazois utilizza il piano della Villa per illustrare la terminologia di Vitruvio sull'architettura delle ville attraverso la sequenza entrata-peristilio. Tuttavia è difficile pensare ad un ingresso diretto al peristilio poiché all'esterno della Villa e nell'intorno di Via delle Tombe sono visibili porzioni di murature che presentano la stessa orientazione dell'abitazione e che potrebbero essere un indice di una precedentemente espansione.

La seconda ipotesi riguarda una espropriazione della sequenza atrium - tablinum. Per dare una idea delle proporzioni della villa è stato sovrapposto alla Villa Diomede una parte della pianta della Casa del Fauno riducendola di un terzo in modo tale da far corrispondere la dimensione dei due peristili; anche la casa del Fauno era una grande casa pompeiana di dimensioni fuori dalla norma, più di 3000 mq posti in fasi successive nel corso del II sec. a.C. caratterizzata anch'essa dalla presenza di due peristili. Con un'istituzione di questo tipo di limiti Villa Diomede avrebbe occupato la Via delle Tombe (fig.2.5).

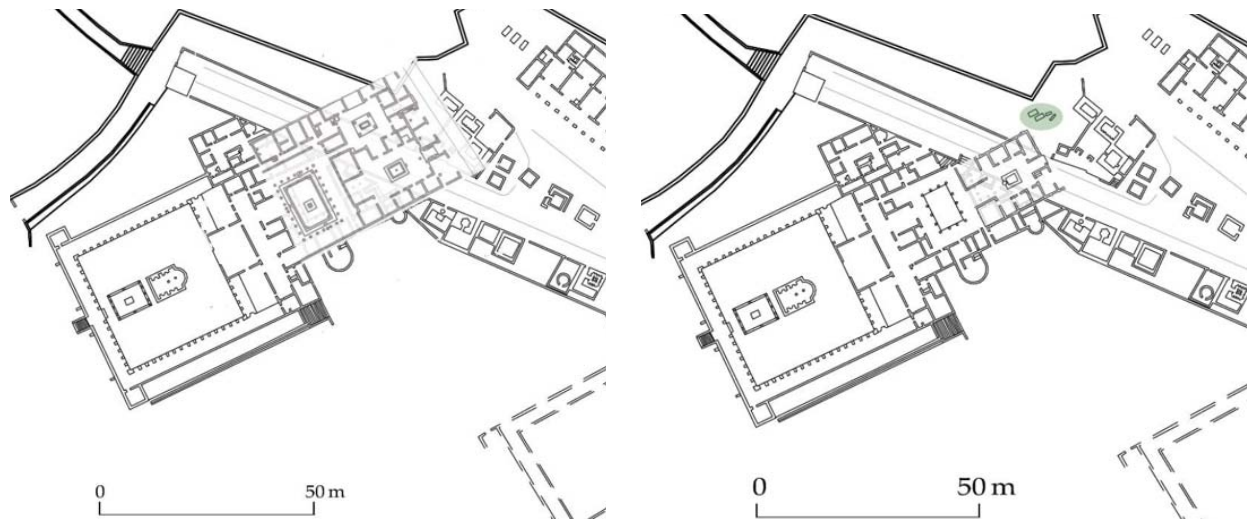


Figura 2.5 - A sinistra: sovrapposizione di Casa del Fauno. A destra: sovrapposizione della pianta della Casa del Chirurgo. [Dessales H. et al (2014)., "Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2013]

Inoltre, le tombe sannite si trovano a ad una quota di 2m dalla strada lastricata che corrisponde pressoché al livello del peristilio della Villa di Diomede. Così, la costruzione di Via delle Tombe, oltre a stroncare la Ville potrebbe aver implicato anche uno scavo e la costruzione del necessario muro di contenimento. Ma la zona in cui sono posizionate le tombe poteva semplicemente corrispondere ad una estensione della città poiché non sembra essere stata oggetto di grandi trasformazioni.

Una trasformazione più limitata fornisce una terza ipotesi intermedia, ottenuta sovrapponendo la Casa del Chirurgo con la sequenza atrium-tablinum. Questa dimora presenta una tecnica di costruzione simile a quella della prima fase di Villa Diomede con dei grandi blocchi di calcare di Sarno. Datando all'inizio del III sec. a.C. questa dimora, si arriva al risultato che l'estensione di Villa non inciderà nelle tombe dell'epoca sannita escludendo la relazione tra la necropoli e la Villa (fig.2.5).

2.4 I principali cantieri della Villa

Secondo A. Maiuri in "L'ultima fase edilizia di Pompei"²⁷ la storia della Villa può essere globalmente divisa in divisa in tre periodi:

- 1) Periodo preromano, sicuramente attestato dagli elementi calcarei che abbondano nelle strutture del nucleo primitivo dell'atrio e del tablino e dalla presenza di un loggiato di colonne (originariamente in tufo), che si sviluppava innanzi all'ambulacro del tablino;
- 2) Periodo augusteo, di ampio radicale rifacimento e ampliamento, a cui si deve la costruzione del bagno, del quartiere al piano del giardino, del grandioso quadriportico a pilastri e dell'avanzamento delle stanze del piano superiore sulla linea del portico;

²⁷ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, pp.157-158

- 3) Periodo neroniano-flavio (post 63) di ampi restauri, di parziali aggiunte e di quasi completa ridipintura delle pareti.

La prima fase di costruzione della Villa potrebbe essere datata al III sec. a.C. con il piano terra allo stesso livello del terreno e l'ingresso senza l'attuale dislivello. Successivamente, la parte anteriore della Villa venne probabilmente trasformata per l'ubicazione di Via delle Tombe e al piano terra vennero effettuate modifiche nella zona del bagno per far fronte all'adattamento alla rete dell'acquedotto. Seguì l'estensione della villa verso il mare con la costruzione del grande giardino, del criptoportico e del quadriportico che trasformò la residenza in una grande villa aperta verso il mare. È difficile individuare una precisa datazione di tali interventi; secondo lo studio dei dipinti del IV stile T. Fontaine li ritiene appartenenti al periodo precedente al terremoto del 62-63 d.C. Anche l'analisi tipologica condotta nelle nicchie della vasca del giardino suggeriscono una datazione verso la metà del I sec. d.C.

Una singolarità riscontrata a Villa Diomede è il taglio di alcuni elementi costituenti il quadriportico a forma di trapezio o parallelogramma. Questa applicazione sistematica non trova corrispondenti a Pompei e contribuisce ad isolare il carattere eccezionale del cantiere di costruzione della Villa (fig.2.6).



Figura 2.6 - Particolari degli elementi a forma di trapezio visibili al livello del giardino

2.5 Impatto del terremoto del 63 d.C.

Un altro aspetto importante per lo studio dell'edificio è riconoscere quali fossero state le sue condizioni dopo il terremoto del 62 (o 63) e le successive scosse precedenti all'eruzione del 79.²⁸

Nel muro sud del quadriportico, che individua il confine con l'esterno, sono presenti e ancora oggi visibili una serie di tamponamenti. Gli sforzi per la definizione delle fasi evolutive si sono perciò concentrati in questa zona inquadrando la loro realizzazione successivamente ad un evento sismico²⁹ che ha causato la modifica della circolazione nella zona sud del giardino della Villa (fig.2.7).

È importante comprendere l'effettivo funzionamento della villa negli ultimi anni di vita in modo da integrare le strategie adottate dai proprietari in seguito al terremoto precedente all'eruzione. Alcuni elementi ritrovati durante gli scavi suggeriscono che il piano del giardino era funzionale mentre la parte del piano terra risultava meno adatta allo svolgimento delle mansioni quotidiane per degli interventi che vi erano in corso.³⁰

Uno studio degli ambienti 15-16-17 confermano l'ipotesi che gli spazi del piano terra furono sacrificati a favore di una riorganizzazione del piano giardino. Questi ambienti racchiudono diverse fasi costruttive: in principio l'abside non esisteva, le stanze 15 e 16 che inizialmente costituivano un unico spazio si aprivano verso il peristilio attraverso una grande apertura, successivamente venne aggiunto l'abside (pezzo 17) a formare una grande sala aperta sul giardino, usanza delle grandi case aristocratiche. Nella sua forma più recente presenta ulteriori trasformazioni la cui interpretazione resta difficile e l'abbondanza di materiali eterogenei ritrovati in questa stanza fa pensare che fosse adibita a deposito, probabilmente in seguito ad eventi sismici.



Figura 2.7 - Vista dell'esterno del muro sud del quadriportico, sono evidenti due delle numerose tamponature presenti

²⁸ Dessales H et al (2015), "*Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2014*", *Cronique des activités archéologiques de l'Ecole française de Rome*, cap.11

²⁹ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani,, p.158

³⁰ Fiorelli G. (1860-64), *Pompeianarum Antiquitatum Historia*, Napoli.

2.6 Restauri

La documentazione fotografica mette in evidenza che durante gli anni della scoperta alcune parti della Villa erano fortemente danneggiate, un esempio è il portico nord che si presentava completamente abbattuto e ancora non è certo se tale danno fosse stato causato dall'eruzione del 79 a.C. oppure dalla incompiutezza dei lavori di restauro dopo il terremoto del 63 d.C. Anche i pilastri del lato ovest erano dimezzati in altezza³¹. Tale quadriportico, che oggi risulta completo in tutte le sue parti, è testimone di interventi di restauro che la Villa ha ospitato dopo gli anni della scoperta (fig.2.8).



Figura 2.8 – Incisione di Mazois F, les ruines des Pompei

Appartengono all'ultima fase edilizia di Pompei, oltre a molte sarciture e ricuciture che si notano tanto nel muro di facciata sulla Via delle Tombe, quanto nei muri del livello superiore, le seguenti opere murarie³²:

- Il protiro con colonne laterizie che dovette sostituire un più antico ingresso a semplice podio (fig.2.9);
- Le colonne dell'atrio polistilo ritoccate e ridipinte;
- La vasca del frigidarium del bagno la cui parete dipinta corrisponde ad una delle grosse risarciture del muro esterno di facciata, oltre al quasi completo rifacimento della decorazione del portichetto, del tepidario e del calidario;
- Il restauro parziale del portico, i cui pilastri dell'ambulacro occidentale appaiono costruiti in opera mista di tufi e mattoni e non di soli conci di tufo che si hanno nei pilastri del lato orientale e meridionale;

³¹ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, p.158

³² Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, p.158

- Occlusione con muratura di tutte le finestre del muro del portico settentrionale e meridionale e ridipintura delle pareti a semplici pannelli di rosso e giallo (fig.2.7);
- Costruzione delle due "torrelle" quadrate alle estremità del portico, le cui strutture in opera mista di tufi e mattoni, appare evidentemente aggiunta e innestata alla più antica struttura dei muri in opera incerta (fig.2.7);
- Costruzione del triclinio estivo nell'area del giardino e parziale restauro della piscina con la fontana (fig.2.10);
- Costruzione dei quattro barbacani di rinforzo addossati al muro esterno del lato occidentale, la cui funzione è evidentemente quella di contenere e irrobustire un muro strapiombante a causa di qualche grave scotimento tellurico (fig.1.10).³³

I giornali di scavi (PAH) evidenziano alcuni interventi di consolidazione e ricostruzione che avvennero in parallelo agli scavi tra il 1771 e 1775 riguardanti principalmente il rifacimento della loggia verso il giardino (ambienti 42,43,44) che impedì l'accesso alla fontana inferiore un tempo accessibile da questo livello, il consolidamento delle volte del portico posto a sud con la stessa tecnica di restauro che fu utilizzata per il Tempio d'Iside e la ricostruzione dei pilastri del portico nord³⁴.

Nei successivi restauri del 1970 è stato ricostruito il portico e il muro a nord del grande peristilio inferiore. Nel 1996, dopo il crollo, è stata ripristinata la facciata est e nel 2004 si sono coperti gli ambienti del piano terra con delle strutture provvisorie.



Figura 2.9 – protiro d'ingresso [A.Maiuri, *L'ultima fase edilizia di Pompei*]

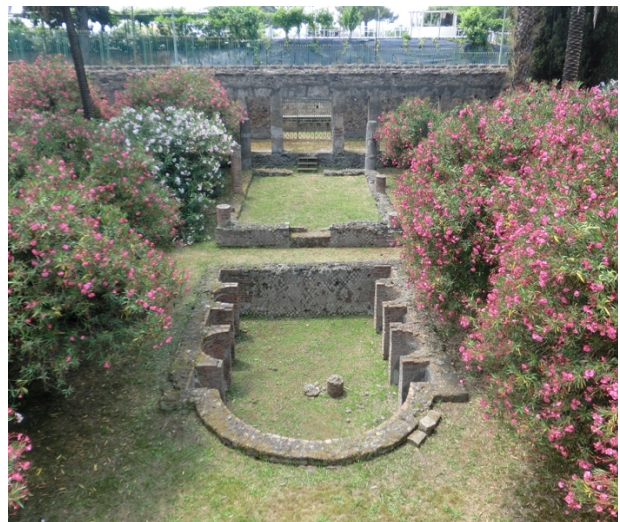


Figura 2.10 – triclinio estivo e piscina

³³ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, pp.157-158

³⁴ Dessales H et al (2015), "*Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2014*", *Cronique des activités archéologiques de l'Ecole française de Rome*

2.7 Rilievo geometrico

Nella lettura dell'attuale pianta della Villa è fondamentale tener presente delle evoluzioni che si sono precedentemente descritte e ricondurre gli spazi secondo una organizzazione a tre livelli: il piano terra (fig.2.11), il piano del giardino (fig.2.12) e il piano del criptoportico (fig.2.13).

Da Via delle Tombe si accede alla Villa attraverso sette scalini posti nel muro nord e si arriva al peristilio attorno al quale si sviluppano gli ambienti principali della costruzione. Il lato est ospita le terme e la cucina, il lato sud invece è caratterizzato dai due absidi e dagli ambienti 12, 13, 14, 15, 16 che conservano ancora oggi la testimonianza di tamponature, restauri e trasformazioni. A nord si sviluppano altri ambienti di servizio tra cui il lungo corridoio che conduce al sottostante piano del giardino (fig.2.14-2.15). A ovest è posizionata la terrazza e un altro collegamento verticale (a sud-ovest) permette di collegare i tre piani. Il piano del giardino, raggiungibile da nord con il corridoio 62 oppure da sud-ovest tramite le scale, ospita il grande quadriportico organizzato attorno al giardino con una piscina posta centralmente e il triclinio estivo tra quest'ultima e il confine ovest del portico (fig.2.10-2.14).

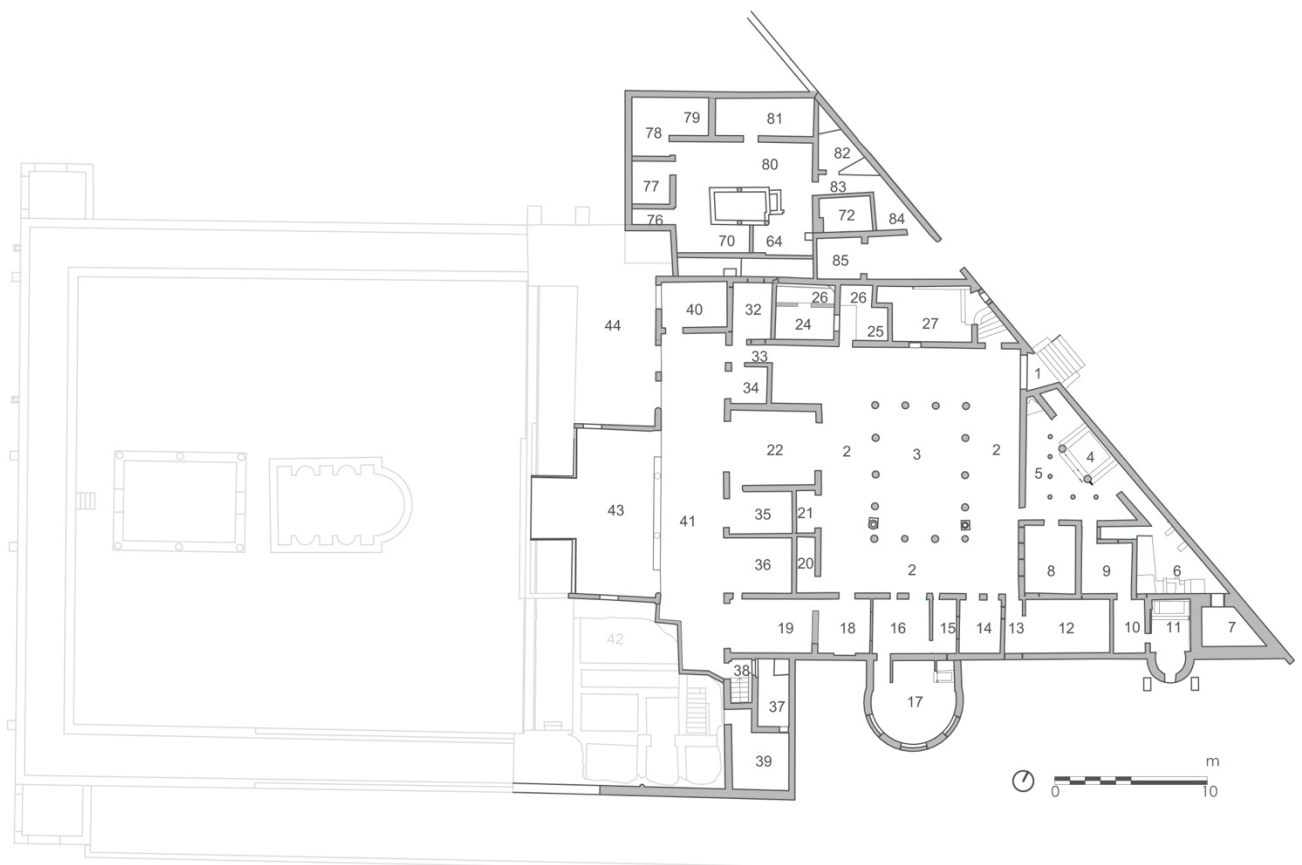


Figura 2.11 - Pianta del piano terra

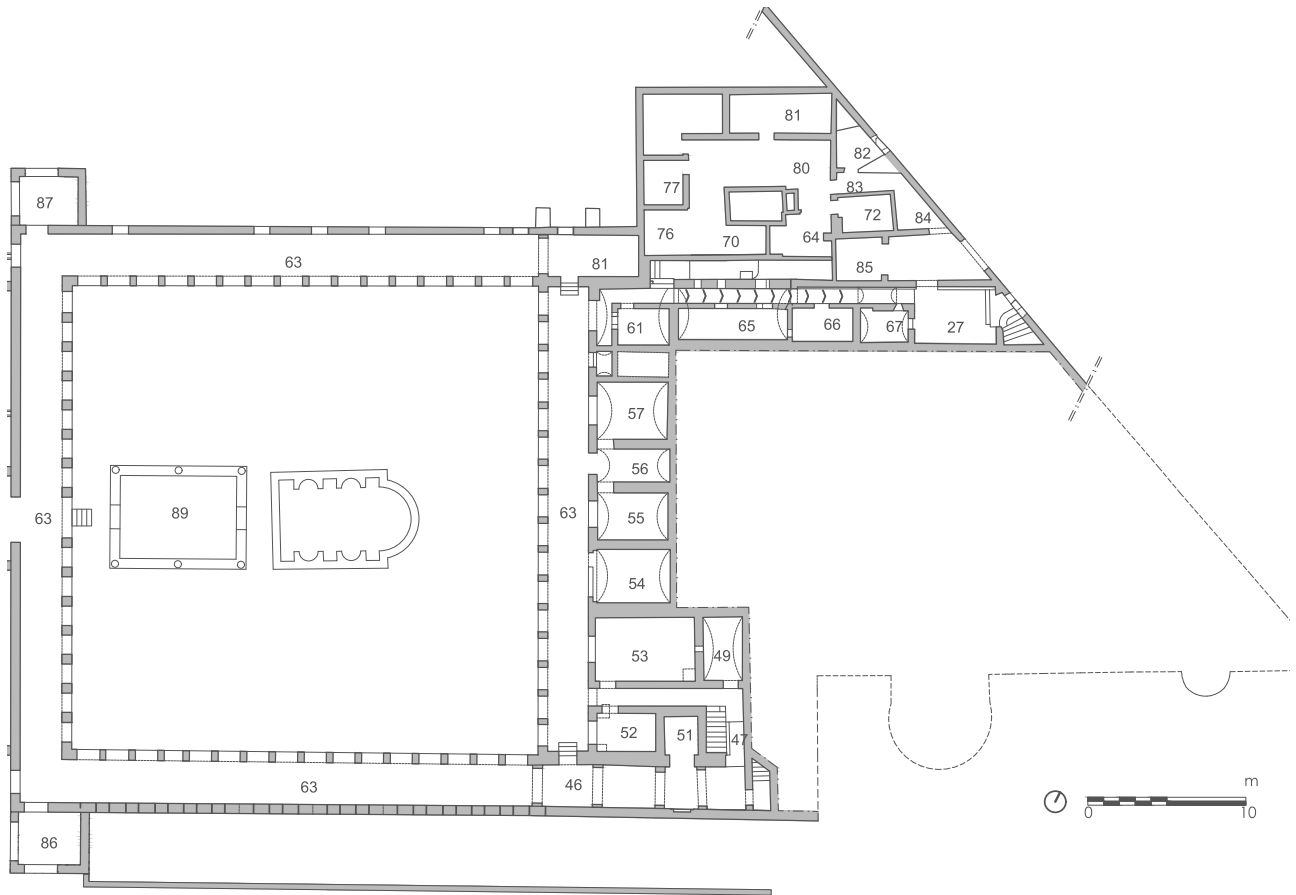


Figura 2.12 - pianta del livello del giardino

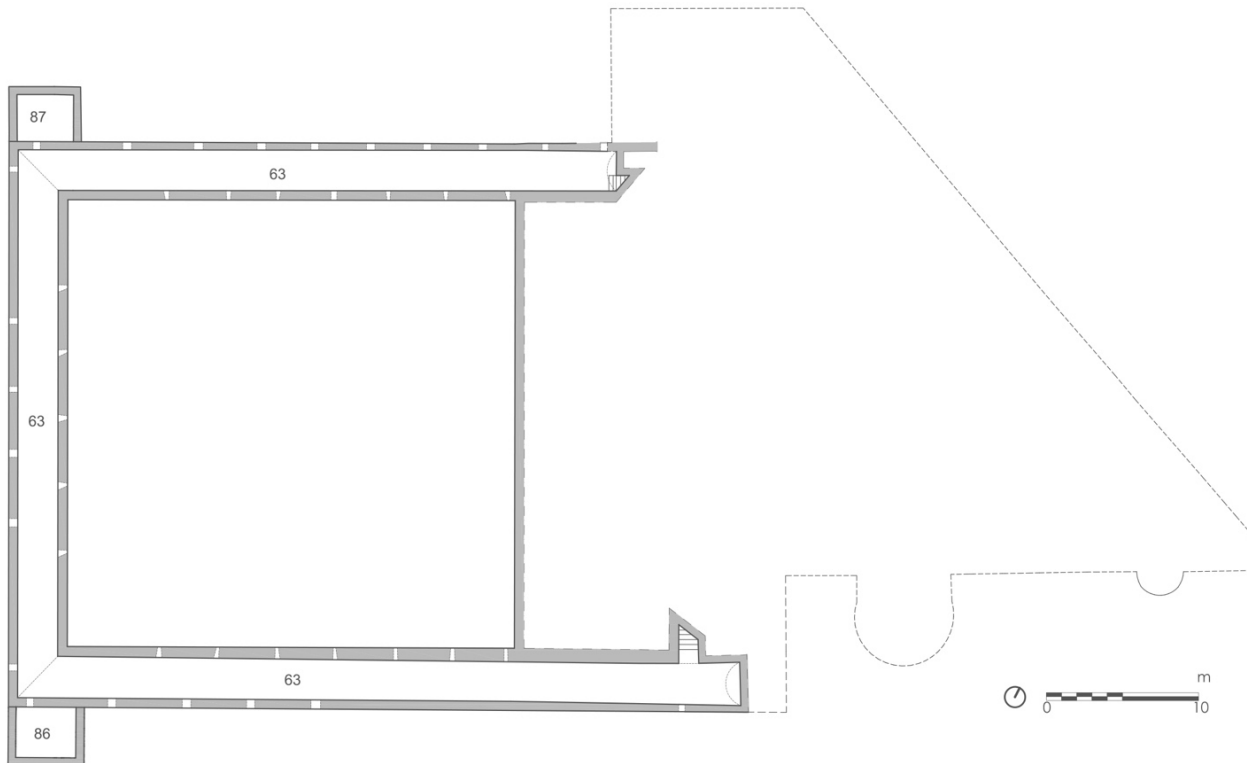


Figura 2.13 - Pianta del criptoportico

Capitolo 2

Gli estremi del lato occidentale presentano delle torrette che mettevano in comunicazione il livello del portico con un camminamento in quota che girava tutt'intorno al giardino, ora non più visibile.

La pianta del criptoportico, con aperture a intervalli regolari destinate a illuminarlo, descrive un ambiente seminterrato ed è la proiezione del sovrastante spazio compreso tra i muri nord, sud ed ovest e i rispettivi pilastri che delimitano il giardino.

I materiali con cui sono costruite le varie porzioni e i diversi ambienti che la compongono sono per lo più gli stessi che caratterizzano l'intera città antica ossia Pietra di Nocera, calcare di Sarno, tufo giallo, tufo grigio, lava, cruma ed elementi in cotto mentre per quanto riguarda la tecnica costruttiva, a Villa Diomede prevale, soprattutto per il piano terra, l'opus incertum (cfr par.1.5). Il peristilio e i due corti muri che delimitano l'ingresso verso l'esterno vengono ricondotti all'opus testaceum. Scendendo, la parte est del piano del giardino è anch'essa caratterizzata dall'impiego dell'opus incertum, per i pilastri del portico invece, prevale l'opus mixtum tranne per la parte settentrionale segnata dai restauri moderni.

Il rilievo geometrico correlato da un rilievo fotografico si trovano agli allegati B1 e B2.



Figura 2.14 - vista dall'ambiente 46 del portico, lato sud



Figura 2.15 - vista del lato ovest del peristilio



Figura 2.16 - vista verso il lato est del piano terra. Fotografia effettuata dallo spazio 43

2.8 Rilievo delle tipologie murarie

Con il supporto delle fotografie scattate in sito durante la campagna di marzo 2015 e con l'ausilio di immagini fotogrammetriche a nostra disposizione si sono individuate le tipologie murarie in termini di forma e dimensione dell'elemento costituente la muratura delle porzioni sud del piano terra e del muro sud del livello del giardino.

La presenza di intonaco che copre i paramenti di alcune stanze non permette di riconoscere l'elemento sottostante per cui nelle diverse schede riassuntive comparirà anche lo strato coperto opportunamente individuato. I paramenti sono stati suddivisi secondo il seguente elenco: pietra squadrata, pietra sbazzata, opus reticulatum, paramento con ricorsi in laterizio, pietra irregolare con elementi resistenti di piccole dimensioni, pietra irregolare con elemento resistente di grande dimensione, pietra irregolare con elemento resistente di medio-grande dimensione, pietra irregolare con giunti di malta di spessore elevato (figg.2.17-2.18).

La procedura con cui si sono stese le schede corrisponde a quella intrapresa nella fase del rilievo del danno e del degrado con la schematizzazione in schede secondo la stessa organizzazione: pianta generale utile alla localizzazione dell'ambiente, pianta a più ampia scala per una facile lettura delle informazioni, fotografia e illustrazione grafica.

Per la consultazione completa si rimanda all'allegato B3.

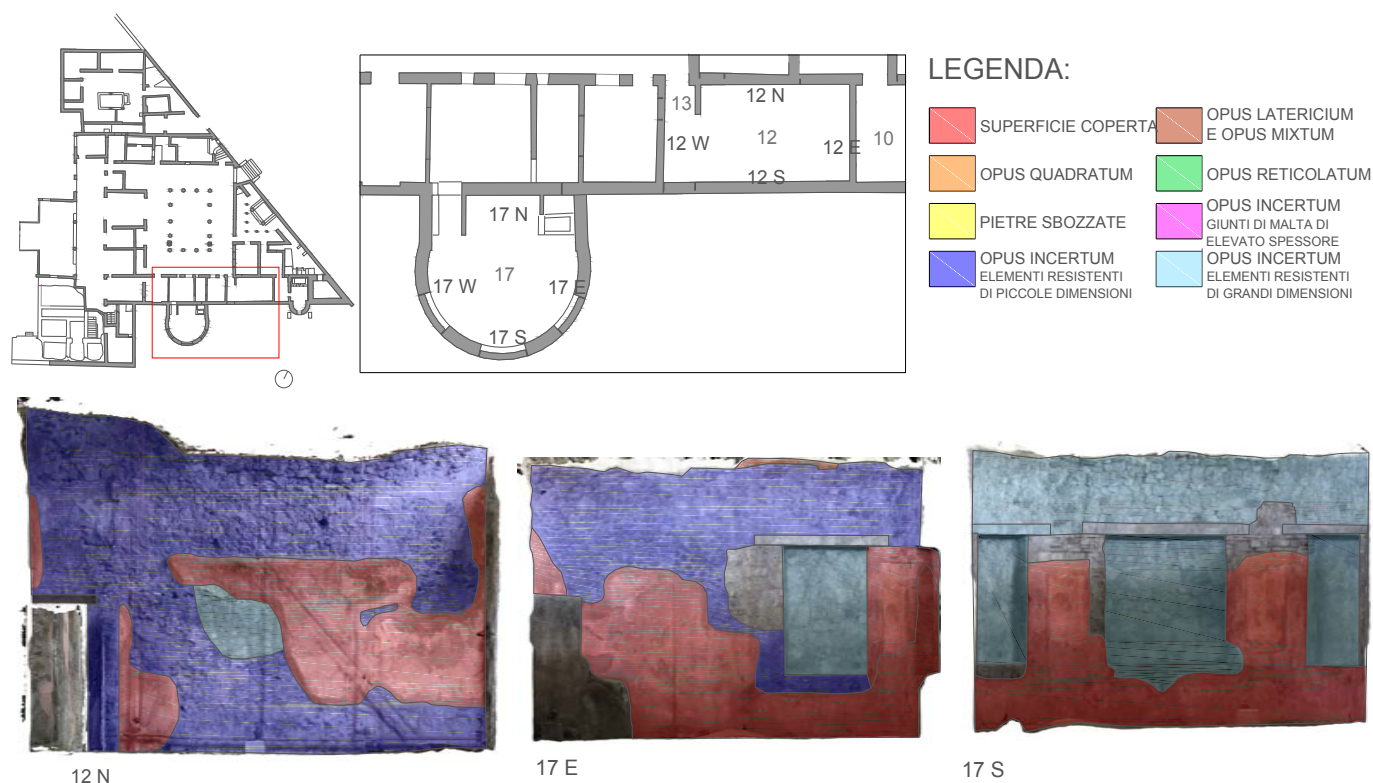


Figura 2.17 – Esempio di restituzione grafica di tipologie murarie

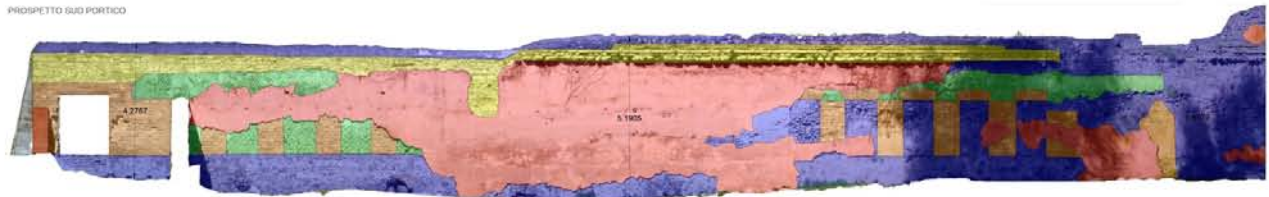


Figura 2.18 – Prospetto sud del portico, esempio di restituzione grafica

Il primo sopralluogo, quindi, è risultato fondamentale per la verifica in sito delle quote a nostra disposizione e per la raccolta di tutte le informazioni utili a creare un quadro conoscitivo completo delle parti interessate all'analisi della costruzione. Il punto di arrivo della prima campagna corrisponde alla redazione delle schede del degrado, del quadro fessurativo e delle tipologie murarie, basi per la stesura di un piano di indagini e la sua applicazione durante la seconda campagna³⁵ (capitolo 3).

2.9 Rilievo del degrado e quadro fessurativo

Durante il primo sopralluogo effettuato dal 29 al 31 marzo 2015 è stato condotto un rilievo preliminare del degrado e dei danni dell'edificio, sia al piano terra sia al piano del giardino, accompagnando le informazioni con una opportuna documentazione fotografica.

Mediante un'indagine visiva è stato possibile identificare il degrado materico e i dissesti localizzati nei vari settori che compongono la villa, fondamentale per il riconoscimento delle criticità e dei cedimenti che ha subito l'edificio nel tempo. La stesura di un quadro fessurativo in grado di evidenziare le carenze del sistema strutturale sarà particolarmente utile nei capitoli successivi in quanto una lesione, al verificarsi di un sisma, può essere un percorso preferenziale per l'attivazione di uno specifico meccanismo di collasso condizionando in questo modo la risposta sismica del fabbricato.

Rilievo del degrado

Nei secoli che la Villa ha trascorso coperta dallo strato di pomice e lapilli dell'eruzione del 79 d.C. si è in qualche modo mantenuta l'organizzazione fisica delle strutture ma allo stesso tempo è stata inevitabilmente esposta all'azione dell'acqua e al conseguente verificarsi di fenomeni fisici, chimici e biologici che hanno influenzato le caratteristiche dei singoli elementi e del manufatto archeologico in generale.

Per una più semplice individuazione dei fenomeni di degrado dei materiali costituenti le superfici esterne di Villa Diomede, si sono fatte uso delle indicazioni riportate nella "Raccomandazioni NorMaL 1/88. Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico". Secondo tale raccomandazione per alterazione si intende "una modificazione del materiale che non implica necessariamente un peggioramento delle sue

³⁵ La seconda campagna di indagini si è svolta dal 01 giugno al 06 giugno 2015.

caratteristiche sotto il profilo conservativo”, mentre con il termine degradazione si intende una modifica che implica sempre un peggioramento.³⁶

A Villa Diomede lo stato di degrado è dovuto a una moltitudine di fattori che comprendono le azioni degradanti da parte di microrganismi, aggressioni chimiche di sostanze inquinanti presenti nell’ambiente, discontinuità conseguenti alla presenza di fessurazioni, infiltrazioni di acqua, azioni del vento, cicli di gelo disgelo, accumuli di umidità ed altri fenomeni che caratterizzano le conseguenze dovute all’esposizione del manufatto all’ambiente.

L’individuazione delle alterazioni e delle degradazioni del manufatto storico oggetto di studio si è svolta attraverso l’esame visivo dei paramenti murari ed associando ad ogni porzione una simbologia grafica in linea con la Normativa sopra citata. I fenomeni individuati tra quelli presenti nelle Raccomandazioni sono:

- Crosta, strato superficiale di alterazione del materiale lapideo o dei prodotti utilizzati per eventuali trattamenti. Di spessore variabile, è duro, fragile e distinguibile dalle parti sottostanti per le caratteristiche morfologiche e, spesso, per il colore. Può distaccarsi anche spontaneamente dal substrato che, in genere, si presenta disgregato e/o pulverulento;
- Degradazione differenziale, degradazione da porre in rapporto ad eterogeneità di composizione o di struttura del materiale, tale quindi da evidenziarne spesso gli originali motivi tessiturali o strutturali;
- Disgregazione, decoesione caratterizzata da distacco di granuli o cristalli sotto minime sollecitazioni meccaniche. Comporta un sensibile peggioramento delle caratteristiche meccaniche originarie ed un notevole aumento di porosità;
- Distacco, soluzione di continuità tra strati superficiali del materiale, sia tra loro che rispetto al substrato; prelude in genere alla caduta degli strati stessi. Il termine si usa in particolare per gli intonaci e i mosaici. Nel caso di materiali lapidei naturali le parti distaccate assumono spesso forme specifiche in funzione delle caratteristiche strutturali e tessiturali, e si preferiscono allora voci quali crosta, scagliatura, esfoliazione;
- Efflorescenza, formazione di sostanze cristalline, in genere di colore biancastro e di aspetto cristallino, o pulverulento o filamentoso, sulla superficie del manufatto e poco aderente alla superficie. Nel caso di efflorescenze saline, la cristallizzazione può avvenire anche all’interno del materiale provocando, spesso, il distacco delle parti più superficiali: il fenomeno, in questi casi, prende il nome di cripto efflorescenza o di sub-efflorescenza;
- Erosione, asportazione di materiale dalla superficie dovuta a processi di natura diversa. Quando sono note le cause di degrado, possono essere utilizzati anche termini come: erosione per abrasione, erosione per corrasione (cause meccaniche), erosione per corrosione (cause chimiche e biologiche), erosione per usura (cause antropiche);

³⁶ *Raccomandazioni NorMaL 1/88. Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico*, CNR-ICR, 1990, Roma.

Capitolo 2

- Esfoliazione, degradazione che si manifesta con il distacco spesso conseguito da caduta, di uno o più strati superficiali subparalleli fra loro (sfoglie);
- Fratturazione e fessurazione, Degradazione che si manifesta con la formazione di soluzioni di continuità nel materiale e che può implicare lo spostamento reciproco delle parti;
- Lacuna, caduta e perdita di parti di un dipinto murale, con messa in luce degli strati di intonaco più interni o del supporto;
- Mancanza, Caduta e perdita di parti. Il termine si usa quando tale forma di degradazione non è ascrivibile con altre voci del lessico;
- Presenza di vegetazione, Locuzione impiegata quando vi sono licheni, muschi e piante.

Nelle seguenti figure (figg.2.19-2.20) vengono riportati alcuni esempi di rilievo e restituzione grafica effettuati per le stanze del piano terra e per i muri d'ambito sud e est. I rilievi completi rientrano nell'allegato B4.

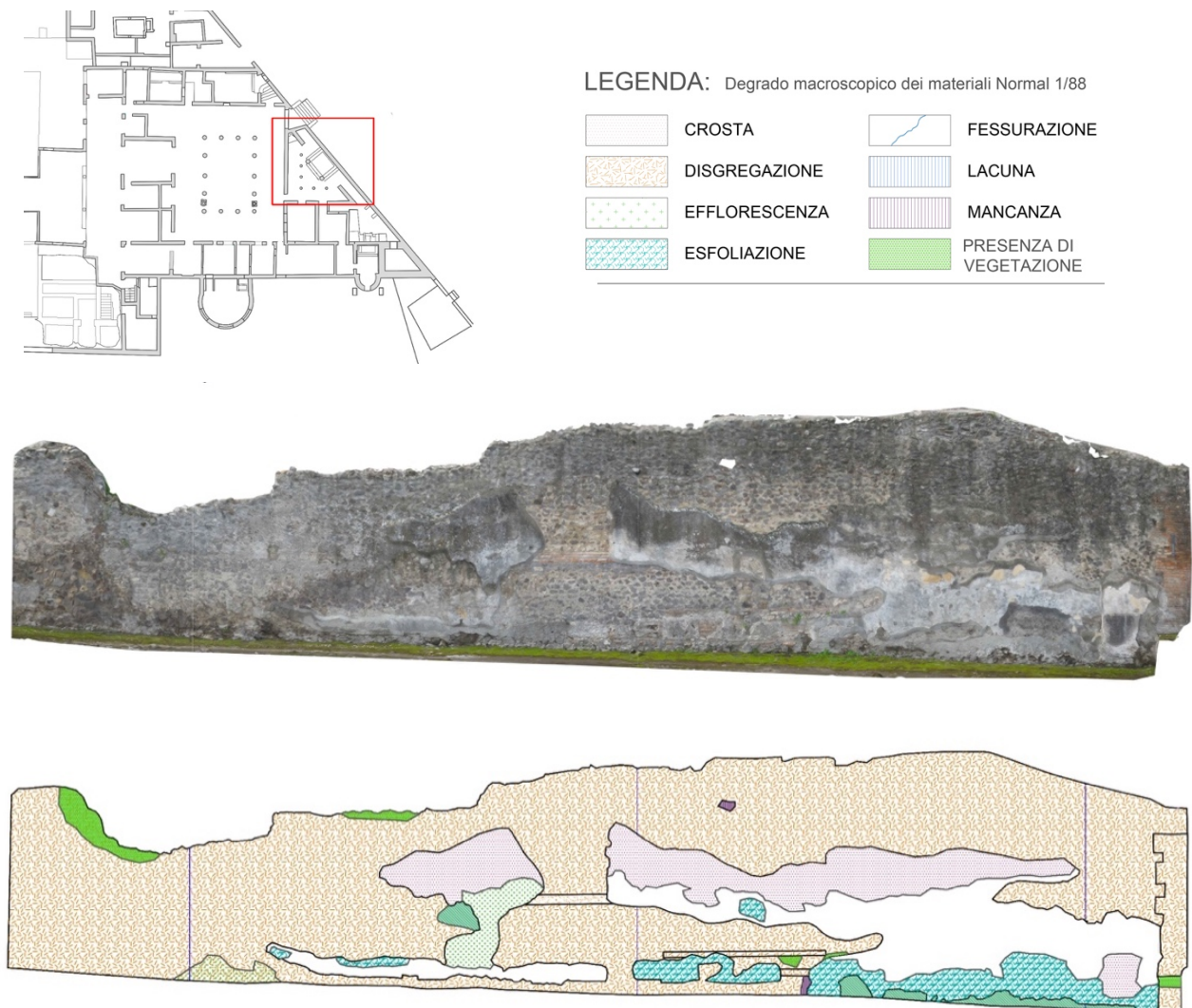


Figura 2.19 - Esempio di restituzione grafica del rilievo del degrado, prospetto est

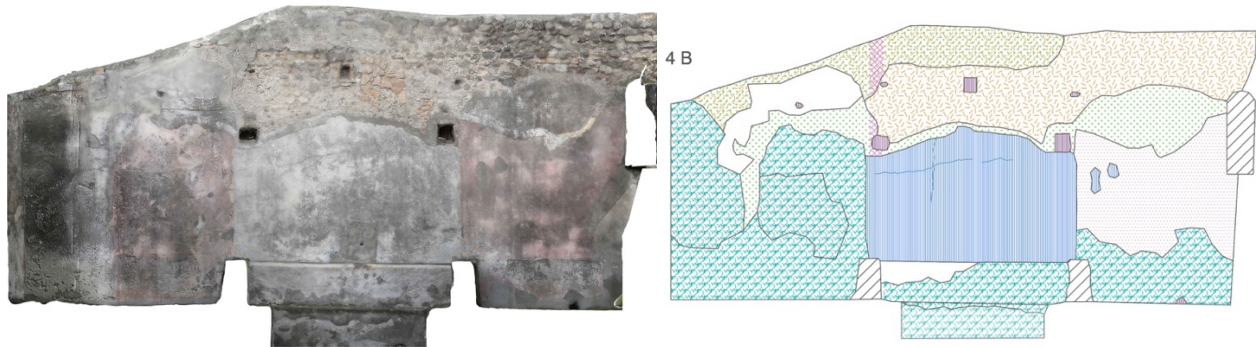


Figura 2.20 - Esempio di restituzione grafica del degrado, ambiente 4

Quadro fessurativo

Questa fase di rilievo ha presupposto la conoscenza delle ormai note problematiche riguardo i numerosi e stratificati interventi che si sono ciclicamente succeduti dopo il ritrovamento e gli eventuali eventi calamitosi verificatesi prima dell'eruzione.

Si è articolato il lavoro a partire da una preliminare ispezione visiva dell'intero edificio per consentire di acquisire delle informazioni generali sullo stato di danno e individuare i punti su cui focalizzare una maggiore attenzione. Successivamente, con il supporto grafico di piante e sezioni si sono riportati le principali debolezze dell'edificio: lesioni, mancati ammorsamenti tra le pareti, mancanze di elementi strutturali, cavità, tamponature e discontinuità dovuta alla diversità delle elevazioni murarie sia del piano piano terra sia del piano del giardino.

Per gli ambienti rilevati si sono predisposte delle schede di sintesi: in ognuna di essa è stata riportata la pianta generale evidenziando l'ambiente in esame e una pianta a più grande scala per facilitare la lettura con l'indicazione del numero di fotografia corrispondente e il danno rilevato.

Molte stanze presentano ancora lo strato superficiale che copre il paramento murario per cui le eventuali lesioni potrebbero interessare solo l'intonaco senza compromettere lo stato dell'ossatura portante.

Il sopralluogo ha comunque evidenziato che lo stato di danneggiamento dell'antica costruzione è il risultato dell'azione del tempo e dell'inevitabile degrado dovuto a fattori chimici, fisici e biologici. La maggior parte di lesioni riscontrate hanno andamento verticale e spesso corrispondono ad un allontanamento di porzioni costruite con materiali differenti oppure al mancato ammorsamento di murature tra loro ortogonali (figg.2.21 e 2.22). Sono presenti anche numerose tamponature soprattutto nel muro sud del portico e nelle stanze del piano terra in prossimità dell'abside (fig.2.23). Cavità e mancanze di elementi strutturali si sono verificate per lo più nel piano terra, al livello del giardino, invece, numerosi pilastri costituenti il quadriportico presentano gravi lesioni e una evidente polverizzazione della malta di allettamento tra gli elementi strutturali (fig.2.24).

Si rimanda all'allegato B5 per la consultazione delle schede complete del quadro fessurativo.

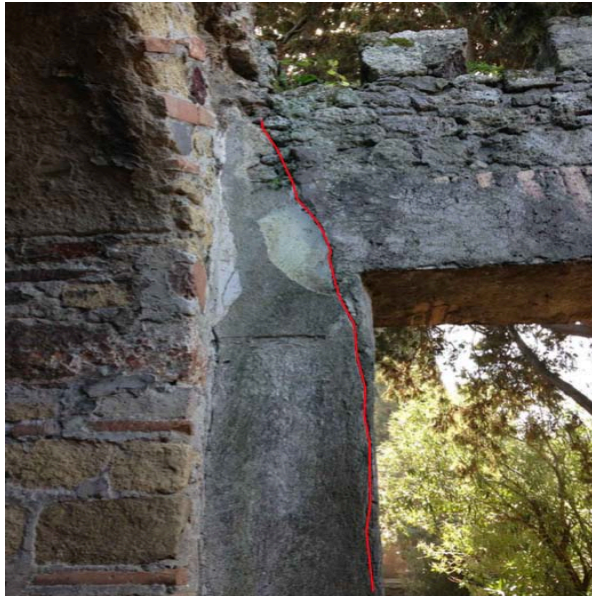


Figura 2.21 - Esempio di fessurazione



Figura 2.22 - esempio di assenza di ammorsamento



Figura 2.23 - esempio di elemento mancante

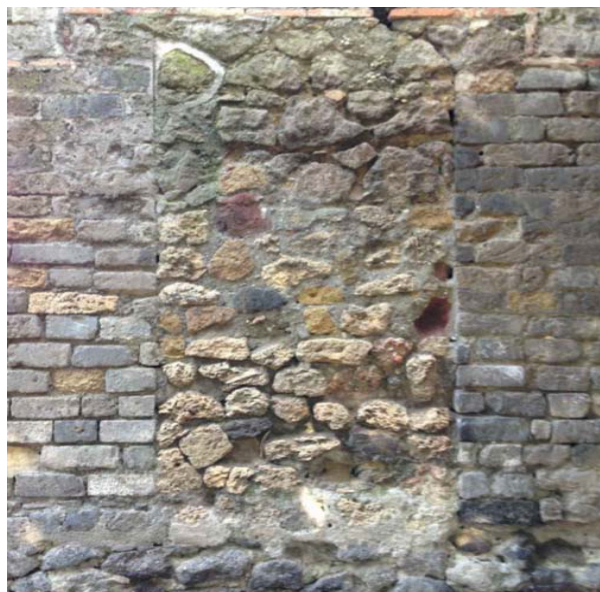


Figura 2.24 - tamponamento di una apertura

2.10 Vulnerabilità

La vulnerabilità di un edificio monumentale è la sua predisposizione ad essere danneggiato da un evento di sismico di una fissata severità.³⁷

La maggior parte delle strutture storiche in muratura presentano alcuni dei parametri della “regola dell'arte” basate sull'esperienza che man mano si acquisiva col tempo. Villa Diomede risale ad un periodo di circa duemilla anni fa presentando notevoli differenze costruttive, dalle tecniche ai materiali. E' facile individuare nel manufatto in esame la presenza di elementi vulnerabili data la scadente qualità muraria, uno stato di manutenzione assolutamente deficitario e le numerose trasformazioni che ha subito. Inoltre, è difficile pensare alla presenza di particolari costruttivi o presidi antisismici capaci di contrastare l'attivazione e l'evoluzione di un meccanismo di danno.

Il terremoto rappresenta la principale causa di danno e di perdita del patrimonio culturale e i meccanismi che portano al collasso della struttura richiamano comportamenti ricorrenti delle diverse parti architettoniche, chiamati macroelementi, che si comportano sostanzialmente autonomamente rispetto al resto della fabbrica. Questi elementi, tra cui uno tipico è la facciata, caratterizzano una vulnerabilità dell'edificio.

Le debolezze riscontrabili a Villa Diomede interessano la maggior parte delle murature costituenti il manufatto poiché si presentano di scadente qualità in termini di tecnica costruttiva e materiale resistente. La costruzione della muratura a due paramenti è essa stessa un elemento di vulnerabilità in quanto, in assenza di diatoni, può verificarsi l'espulsione di materiale o la loro separazione longitudinale, portando al collasso l'elemento verticale.

I numerosi tamponamenti inoltre, posizionati sia alla quota terra sia al livello delle finestrate, il più delle volte, non coprono l'intero spessore murario creando delle nicchie all'interno della muratura.

Come chiaramente espresso nei capitoli precedenti, la distribuzione delle forze non è facilitata a causa dell'assenza di ricorsi regolari orizzontali e gli elementi resistenti essendo eterogenei in forma e dimensione non permettono la creazione di giunti di malta regolari.

La polverizzazione della stessa diminuisce i punti di contatto tra gli elementi che faticano ancora di più a trasmettere i carichi e creando zone a diverso livello di sollecitazione e indebolimenti locali che potrebbero interessare la risposta globale.

Le maggiori vulnerabilità che caratterizzano Villa Diomede sono la mancanza di ammorsamenti tra le pareti ortogonali che, in caso di evento sismico, impediscono alle murature di collaborare tra di loro.

L'assenza di orizzontamenti e la irregolarità in altezza nella quasi totalità del manufatto fanno sì che le accelerazioni sismiche non vengano distribuite, favorendo l'indipendenza delle risposte dei singoli elementi

³⁷ S. Lagomarsino, S. Podestà (CD a cura di), *Inventario e vulnerabilità del patrimonio monumentale dei parchi dell'Italia centro-meridionale e meridionale*, Vol.III - *Analisi di vulnerabilità e rischio degli edifici monumentali*, INGV/GNDT-Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila, 2005.

strutturali ed annullando quello che viene definito “comportamento scatolare”, talvolta evidenziando il rischio di ribaltamento fuori piano delle parti più alte (figg.2.25-2.27).

Anche la presenza di aperture irregolari e vicino agli spigoli non è favore di sicurezza in quanto sono un percorso preferenziale per l'evolversi delle fessurazioni.

La resistenza nel piano della muratura inoltre è compromessa dallo spessore ridotto dei maschi murari, soprattutto nella facciata sud del peristilio (fig.2.25).



Figura 2.25 – apertura vicino agli spigoli e ridotto spessore dei maschi murari

Figura 2.26 – elementi irregolari in altezza



Figura 2.27 – irregolarità in altezza e assenza di orizzontamenti

2.11 Inquadramento sismico

2.11.1 Il rischio sismico di Villa Diomede a Pompei

L'Italia si trova nella zona di convergenza tra la zolla euroasiatica e quella africana ed è di conseguenza sottoposta a notevoli sforzi di compressione dovute ai movimenti tettonici: quando le tensioni accumulate nelle zone di contatto delle placche tettoniche supera la resistenza al taglio degli ammassi rocciosi si producono scorrimenti e rotture che si traducono in "terremoti". Per questo motivo risulta essere uno dei Paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo, intendendo per "rischio sismico" la misura dei danni che, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti), ci si può attendere in un dato intervallo di tempo, ed è determinato da una combinazione della pericolosità, della vulnerabilità e dell'esposizione.³⁸

La pericolosità sismica viene definita come la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un evento sismico che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (PGA). In figura 2.28 è riportata la mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.

La vulnerabilità invece esprime la probabilità che una struttura di un certo tipo possa subire un certo livello di danneggiamento a seguito di un terremoto di una determinata intensità, la misura è strettamente legata alla definizione e valutazione del danno, che a sua volta è legato alla perdita o riduzione di funzionalità dell'opera.

Un altro fattore che definisce il fattore di rischio sismico è l'esposizione che misura la presenza di beni a rischio e, dunque, la conseguente possibilità di subire un danno in termini economici, di beni culturali, vite umane.

Per ridurre gli effetti del terremoto, l'azione dello Stato si è concentrata sulla classificazione del territorio basandosi su intensità e frequenza dei terremoti del passato, con la conseguente applicazione di speciali norme per le costruzioni nelle zone classificate sismiche.

Sino al 2003 il territorio nazionale era classificato in tre categorie sismiche a diversa severità.

Nel 2003 è stata pubblicata l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 sulla Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003 che aveva alla base i criteri di nuova classificazione sismica del territorio nazionale, conclusione di studi ed elaborazioni più recenti relative alla pericolosità sismica del territorio, in particolare sull'analisi della probabilità che il territorio venga interessato in un certo intervallo di tempo (generalmente 50 anni) da un evento che superi una determinata soglia di intensità o magnitudo.

³⁸ <http://www.protezionecivile.gov.it>

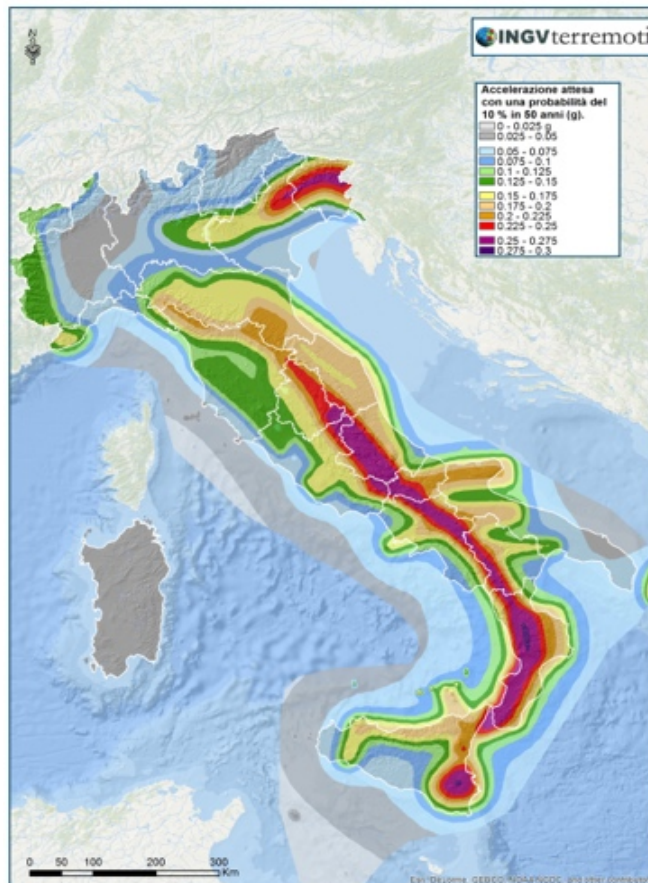


Figura 2.28 - mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. [mi.ingv.it]

Il provvedimento detta i principi generali sulla base dei quali le Regioni hanno compilato l'elenco dei comuni con la relativa attribuzione ad una delle quattro zone, a pericolosità decrescente, nelle quali è stato riclassificato il territorio nazionale:

- Zona 1 - E' la zona più pericolosa. Possono verificarsi fortissimi terremoti
- Zona 2 - In questa zona possono verificarsi forti terremoti
- Zona 3 - In questa zona possono verificarsi forti terremoti ma rari
- Zona 4 - E' la zona meno pericolosa. I terremoti sono rari

Sostanzialmente, sparisce il territorio "non classificato", e viene introdotta la zona 4, nella quale è facoltà delle Regioni prescrivere l'obbligo della progettazione antisismica. A ciascuna zona, inoltre, viene attribuito un valore dell'azione sismica utile per la progettazione, espresso in termini di accelerazione massima su roccia (zona 1=0.35 g, zona 2=0.25 g, zona 3=0.15 g, zona 4=0.05 g).

Un aggiornamento dello studio di pericolosità di riferimento nazionale è stato adottato con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006.

Il nuovo studio di pericolosità, allegato all'Opcm n. 3519, ha fornito alle Regioni uno strumento aggiornato per la classificazione del proprio territorio, introducendo degli intervalli di accelerazione (a_g), con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni, da attribuire alle 4 zone sismiche.

A ciascuna zona o sottozona è attribuito un valore di pericolosità di base, espressa in termini di accelerazione massima su suolo rigido (a_g).

Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008), hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali: per ciascuna zona – e quindi territorio comunale – precedentemente veniva fornito un valore di accelerazione di picco e quindi di spettro di risposta elastico da utilizzare per il calcolo delle azioni sismiche.

Dal 1 luglio 2009 con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, per ogni costruzione ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali.³⁹

Il territorio di Pompei è stato definito come zona sismica 2, che, secondo la definizione dell'Ordinanza del PCM n. 3519/2006, è una Zona con pericolosità sismica media, dove possono verificarsi terremoti abbastanza forti, soggetta ad accelerazione con probabilità di superamento del 10% in 50 anni compresa tra 0,15g e 0,25g (Tab.2.1).⁴⁰

Tabella 2.1: Suddivisione delle zone sismiche in relazione all'accelerazione di picco su terreno rigido (OPCM 3519/06)

Zona sismica	Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (a_g)
1	$a_g > 0.25$
2	$0.15 < a_g \leq 0.25$
3	$0.05 < a_g \leq 0.15$
4	$a_g \leq 0.05$

2.11.2 Storia sismica dell'area

Una scossa sismica particolarmente rilevante è stata quella del 62 o 63 d.C., precedentemente qualche terremoto ne ravvivava la memoria ma probabilmente non presentava la stessa rilevanza.⁴¹

La testimonianza letteraria più importante è di Seneca, contemporaneo all'evento, che ricevette molto probabilmente rapporti di testimoni oculari, e conserva un resoconto dettagliato del terremoto nel VI libro delle "Naturales Quaestiones"; un altro ma breve riferimento è riportato da Tacito. È stato discusso a lungo il problema della datazione di questo terremoto per una discordanza tra le due fonti letterarie che lo ricordano: Tacito lo data all'anno 62, Seneca sembra datare la scossa al 5 febbraio 63. I filologi si sono

³⁹ www.esse1.mi.ingv.it

⁴⁰ Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003.

⁴¹ L'Italia Monumentale. Collezione di monografie sotto il patronato della Dante Alighieri e del Touring Club Italiano, *Pompei*, Milano, P.Bonomi Editore, 1917, p.5

a lungo divisi su questo contrasto di date; tuttavia, dopo una serie di studi effettuati da molti studiosi, Hine nel 1984⁴² ribadì la fondatezza della datazione del terremoto al 5 febbraio 62 d.C.⁴³

L'avvenimento narrato da Seneca ha ispirato anche due bassorilievi votivi, in un dei quali è figurato il tempio di Giove e l'Arco di Trionfo inclinati dal cataclisma, mentre nell'altro si vede rovinare la porta del Vesuvio presso in gran serbatoio d'acqua (fig. 2.29).⁴⁴



Figura 2.29 - Larario della Casa di Cecilio Giocondo, con la raffigurazione degli edifici del Foro scossi per effetto del terremoto. [Dessaies H. et al (2014)., "Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2013]

Alcuni esperti hanno voluto ragguagliare la descrizione di Seneca alla scala Mercalli classificando l'intensità dell'impulso sismico di Pompei al IX grado (disastrosa).⁴⁵

Possiamo inserire a questo punto anche l'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.: non erano ancora stati completati i lavori di ristrutturazione, quando la mattina del 24 agosto o comunque in un periodo compreso tra agosto e novembre del 79⁴⁶, una violenta eruzione del Vesuvio pose definitivamente fine alla vita di Pompei. Una incessante pioggia di ceneri e lapilli gravò sulle coperture della città provocandone i crolli; la pioggia di ceneri continuò per altri quattro giorni, poi terminò definitivamente seppellendo Pompei sotto una coltre di circa sei metri di materiale vulcanico.

La città non viene più ricostruita, anzi, il territorio dove sorgeva iniziò a ricoprirsi di vegetazione, scomparendo definitivamente col trascorrere dei secoli.⁴⁷

Dall'anno 1000 d.C. al 2006 gli eventi sismici nel territorio di Pompei possono essere riassunti grazie al grafico di figura 2.30⁴⁸ che riporta in ascissa gli anni e in ordinata l'intensità sismica MCS⁴⁹ con intensità epicentrale superiore a 4-5.

Nella figura 2.31 è riportata invece la storia sismica di Pompei e sono indicate l'intensità al sito (MCS), data ed ora dell'evento, l'area epicentrale e la magnitudo momento (Mw). Dalle due figure si nota che le

⁴² Hine H.M. (1984), *The date of the Campanian earthquake A.D. 62 or A.D. 63, or both?*, in "L'Antiquité Classique", Bruxelles, vol.53, pp.266-269.

⁴³ www.storing.ingv.it

⁴⁴ L'Italia Monumentale. Collezione di monografie sotto il patronato della Dante Alighieri e del Touring Club Italiano, *Pompei*, Milano, P.Bonomi Editore, 1917, pp.5-6

⁴⁵ Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani, pag.8

⁴⁶ Ancora oggi è acceso il dibattito della datazione della catastrofe

⁴⁷ www.it.wikipedia.org

⁴⁸ www.emidius.mi.ingv.it

⁴⁹ Scala macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg (MCS 1930), composta da 12 gradi, che descrivono i danni percepiti, al fine di caratterizzare l'intensità relativa delle scosse sismiche

maggiori scosse tra quelle registrate sono quella del 5 dicembre 1456 con epicentro in Molise, i due fenomeni del 1930 dell'Irpinia e del 5 maggio 1990 di Potentino. Le altre scosse sono state avvertite nel territorio con effetti di intensità tra 3 e 5.

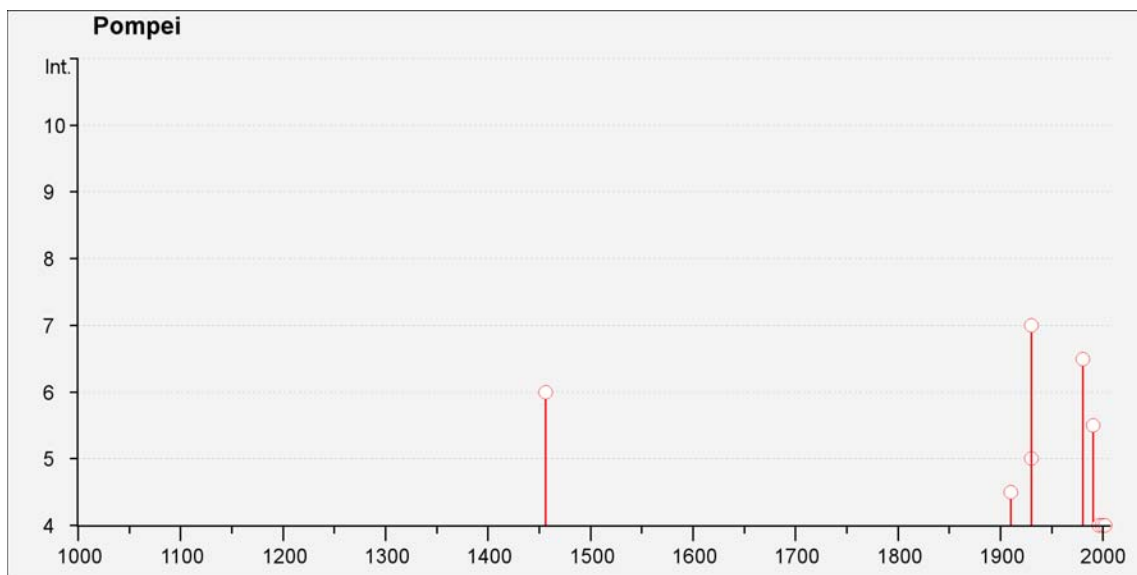


Figura 2.30 - Grafico dei terremoti avvenuti a Pompei dal 1000 d.C. al 2006 che riporta in ascissa gli anni e in ordinata l'intensità sismica MCS con intensità epicentrale superiore a 4-5. [www.emidius.mi.ingv.it]

Numero di eventi: 22

Effetti	In occasione del terremoto del:				
I [MCS]	Data	Ax	Np	Io Mw	
6	1456 12 05	MOLISE	199	11 7.22 ±0.13	
RS	1909 08 25 00:22	MURLO	283	7-8 5.37 ±0.10	
4-5	1910 06 07 02:04	Irpinia-Basilicata	376	8 5.73 ±0.09	
RS	1916 07 04 05:07	MONTI SIBILLINI	23	6-7 5.02 ±0.22	
RS	1918 11 24 13:38	TRENTA	4	5 4.30 ±0.34	
RS	1919 02 13 02:20	LAGO TRASIMENO	20	6 4.70 ±0.39	
RS	1919 10 21 00:24	Gargano	28	5-6 5.09 ±0.26	
RS	1919 10 22 06:05	Anzio	142	5.48 ±0.15	
RS	1921 08 28 10:45	SARNANO	13	7 4.83 ±0.52	
RS	1922 06 08 07:47	CALDAROLA	52	6 4.89 ±0.19	
RS	1925 03 08 15:46	Nicosia	19	6-7 4.80 ±0.27	
RS	1926 08 17	ISOLA DI SALINA	44	7-8 5.41 ±0.23	
5	1930 04 27 01:46	SALERNITANO	30	7 4.76 ±0.28	
7	1930 07 23 00:08	Irpinia	547	10 6.62 ±0.09	
6-7	1980 11 23 18:34	Irpinia-Basilicata	1394	10 6.89 ±0.09	
3	1982 03 21 09:44	Golfo di Policastro	126	5.36 ±0.11	
5-6	1990 05 05 07:21	Potentino	1374	5.80 ±0.09	
3	1991 05 26 12:26	Potentino	597	7 5.11 ±0.09	
4	1996 04 03 13:04	Irpinia	557	6 4.93 ±0.09	
4	1999 10 09 05:41	AREA VESUVIANA	38	5 3.85 ±0.19	
4	2002 11 01 15:09	Subapp. Dauno	645	5.72 ±0.09	
NF	2005 05 21 19:55	Irpinia	276	5-6 4.40 ±0.11	

Figura 2.31 - Storia sismica di Pompei con indicate l'intensità al sito (MCS), data ed ora dell'evento, l'area epicentrale e la magnitudo momento (Mw). [www.emidius.mi.ingv.it]

Capitolo 3

Piano di indagini

3. Piano di indagini

Il primo sopralluogo e la conseguente interpretazione e integrazione dei dati in nostro possesso con quelli del gruppo di ricerca della prof.ssa H.Dessales ha permesso di individuare le criticità del complesso di Villa Diomede.

Con l'ausilio del materiale appositamente elaborato si è condotta una seconda campagna di indagine per ottenere maggiori informazioni in merito alla qualità dei materiali che caratterizzano la costruzione in esame e analizzare il comportamento strutturale dei paramenti considerati più vulnerabili e quindi a maggior rischio di collasso in caso di fenomeni sismici. Ci si è posto come obiettivo la valutazione del comportamento meccanico statico e dinamico di parti significative del complesso.

La particolarità del manufatto archeologico e le limitazioni imposte per la tutela e la conservazione del patrimonio dettate dalla Soprintendenza Speciale per Pompei, Ercolano e Stabia⁵⁰, richiedono l'applicazione di procedure sperimentali di tipo non distruttivo che si traduce nell'impiego di metodi che non alterano il materiale e non richiedono la distruzione o l'asportazione di campioni dalla struttura. L'estrema importanza per la tutela del bene culturale è intrinseco al carattere non distruttivo di questa indagine.

Per questo tipo di prove i metodi più comunemente utilizzati si basano sugli ultrasuoni, le radiazioni X e gamma, le vibrazioni, oltre a metodi quali la termografia, l'endoscopia, la tomografia.

I risultati delle indagini condotte applicando questi metodi sono alla base per la valutazione della qualità del materiale, per l'esame dell'integrità strutturale di un suo componente, per la diagnosi e ricerca delle cause di probabili malfunzionamenti strutturali⁵¹ e possono ritenersi utili per future campagne di indagini sperimentali da effettuarsi in sito.

Nel complesso di Villa Diomede, tra le prove non distruttive, si è preferita l'esecuzione di prove soniche dirette e tomografiche (verticali e orizzontali), endoscopiche, dinamiche e georadar riassunte in Tab.3.1.

Di seguito si riporta il programma svolto indicando le relative localizzazioni delle prove e gli aspetti esecutivi affiancati dall'elaborazione dei risultati ottenuti e le relative osservazioni.

⁵⁰ La legge 6 agosto 1981 n. 456 decreta la nascita della Soprintendenza archeologica di Pompei. Fonte: www.pompeisites.org

⁵¹ <http://www.aipnd.it>

Tabella 3.1 - Tipo, ubicazione e numero delle prove eseguite

Obiettivi	Tipo di indagine	Ubicazione	Numero
Identificazione e qualificazione tipologie murarie, verifica stato di conservazione	Prova sonica diretta	Piano terra	4
		Piano del giardino	2
Qualificazione della tipologia muraria, identificazione vuoti e materiali costituenti	Tomografia sonica	Piano terra	0
		Piano del giardino	2
Verifica stato di conservazione, identificazione composizione interna muratura	Endoscopia	Piano terra	3
		Piano del giardino	13
Identificazione comportamento dinamico della struttura	Prova dinamica	Piano terra	2
		Piano del giardino	4
Individuazione di tracce di probabili preesistenze legate a differenti fasi costruttive	Georadar	Piano terra	4
		Piano del giardino	mappati e 10 profili singoli.

3.1 Prove soniche

3.1.1 Procedura e strumentazione

La prova sonora rappresenta una delle tecniche di indagine non distruttive più adottate per le strutture in muratura e sfrutta la propagazione nel materiale dei segnali sonori a frequenze limitate a 20 kHz.

Consiste nella ricezione, per mezzo di un accelerometro, dell'impulso sonoro generatosi all'interno della muratura in seguito all'impatto di un martello strumentato; entrambi i dispositivi sono collegati ad un amplificatore di segnale e ad un convertitore analogico-digitale per la visualizzazione e registrazione dei dati su un computer portatile fornito di scheda multicanale di acquisizione dei segnali ad alta frequenza di campionamento e un appropriato software di visualizzazione e salvataggio dei dati sviluppato in ambiente Labview (fig.3.1).

La funzione d'impulso del martello può essere approssimata ad una sinusoidale la cui larghezza corrisponde al tempo di contatto tra la punta del martello e la superficie, e dipende da diversi parametri, quali la rigidità e il diametro della massa d'impatto usata e la rigidità della superficie della struttura.

La propagazione di segnali generati da un impatto in un solido di dimensioni finite ed eterogeneo è piuttosto complessa ma, brevemente e semplificando, sono prodotte onde superficiali che danno luogo a fronti d'onda circolari che si allargano radialmente sulla superficie, mentre le onde di compressione e di taglio si propagano secondo fronti d'onda semisferici fino ad incontrare lungo il loro percorso disomogeneità che ne modificano l'intensità in termini di velocità e di ampiezza. Per la loro maggiore velocità ed energia, sono generalmente le onde di compressione ad essere prese in considerazione nelle prove soniche.⁵²

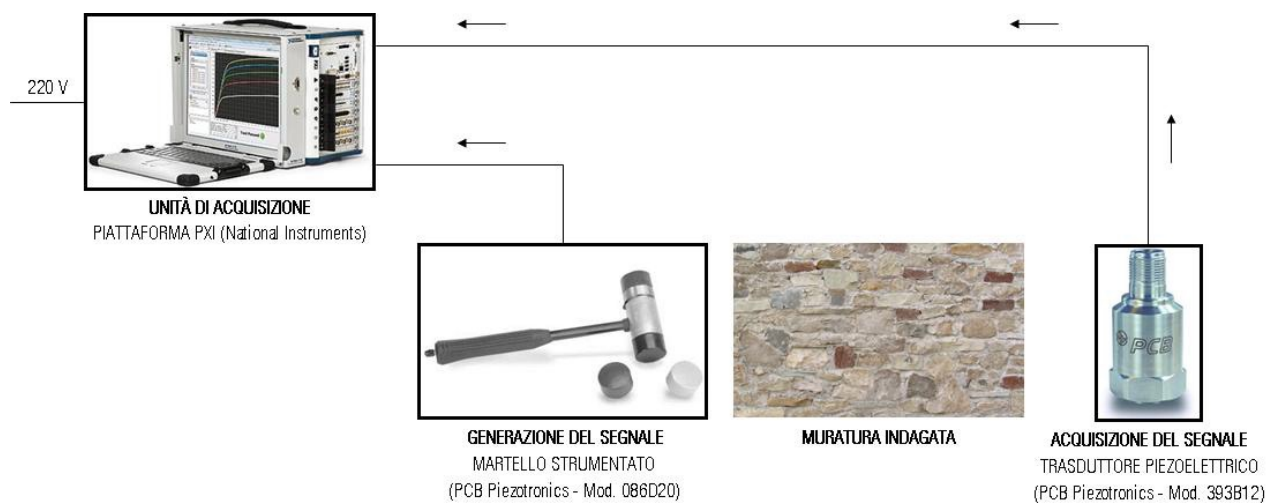


Figura 3.1 - Schema della strumentazione dell'indagine sonora

⁵² www.ndt.net

Le prove soniche possono essere eseguite secondo diverse modalità:

- a) Diretta, martello e accelerometro sono posti alla stessa quota su facce opposte della superficie muraria, per fornire pertanto indicazioni attraverso lo spessore murario (fig.3.2a);
- b) Indiretta, martello e accelerometro si trovano sullo stesso lato della parete, per valutazioni superficiali (fig.3.2b);
- c) Semidiretta, martello e accelerometro sono posti su superfici confluenti, es. i due lati adiacenti di un angolo murario (fig.3.2c).

In ogni caso, i punti di battitura e ricezione vengono fissati su una griglia geometrica nella zona di interesse.

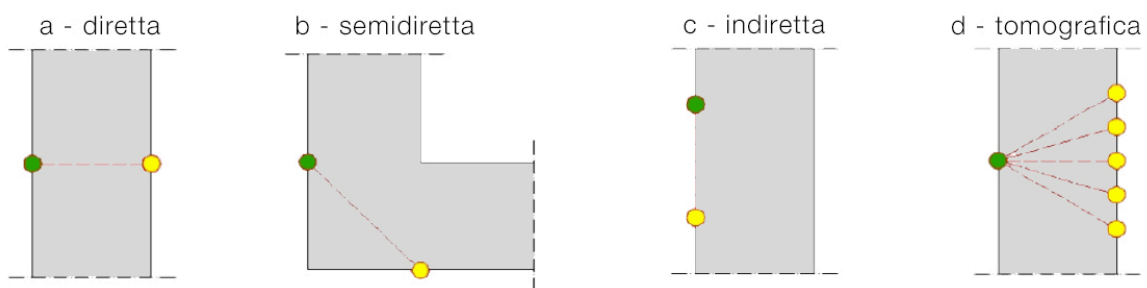


Figura 3.2 - tipologia prove soniche

L'esecuzione della prova sonica si basa sull'assunzione dell'ipotesi fondamentale che il raggio che collega il punto di battitura al punto di ricezione sia la minima distanza rettilinea tra i due punti. Tali ipotesi sono fondamentali in quanto la velocità del segnale ricavata dalla prova è il rapporto $\Delta s/\Delta t$, in cui Δt è il tempo di ricezione del segnale da parte dell'accelerometro, e Δs è la lunghezza del raggio determinata a priori in sito e corrispondente allo spessore del muro. Se venisse meno l'ipotesi di perpendicolarità del raggio, la lunghezza Δs non sarebbe determinata e il risultato della prova sarebbe compromesso. Parametri quali la scabrosità della superficie, il contenuto di umidità e la temperatura del materiale, la lunghezza del percorso, la geometria dell'elemento, lo stato di stress, la presenza di inclusioni metalliche e, naturalmente, crepe, vuoti e difetti, influenzano le misure.

Conoscendo quindi la distanza tra il punto di trasmissione e quello di ricezione e l'intervallo di tempo intercorso tra la partenza e l'arrivo del segnale, è possibile risalire alla velocità con cui si è diffusa l'onda e, di conseguenza, ricostruire l'ipotetica distribuzione della densità interna della muratura⁵³.

La velocità di propagazione di suddette onde elastiche viene relazionata con le proprietà elastiche ed alcune caratteristiche meccaniche e fisiche proprie del materiale che la costituiscono: per le strutture in muratura, tuttavia, a causa dell'intrinseca eterogeneità e anisotropia che caratterizza le tipologie murarie, la velocità delle onde soniche è difficilmente correlabile alle proprietà del materiale (resistenza e rigidità).

⁵³ Rosato L. (2014), *Sviluppo di un nuovo software di elaborazione tomografica per l'applicazione del metodo di indagine sonica per la diagnosi strutturale delle murature esistenti*, Tesi di laurea, Rel. Maria Rosa Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2013-2014

Tale prova, quindi, rappresenta un approccio conoscitivo che valuta l'omogeneità del materiale indicando la presenza di discontinuità o lesioni: una maggiore velocità corrisponde a una maggiore compattezza. Non esiste una scala assoluta di qualificazione delle tipologie murarie in funzione delle velocità soniche, per questo i risultati assumono significato in termini di confronto tra aree diverse, che possono essere messe in relazione con possibili differenze costitutive (presenza di vuoti, disomogeneità materiali) o condizioni di degrado o intervento. Un controllo incrociato di diverse procedure di indagine, per esempio le prove di martinetto piatto, può essere un ottimo metodo per confermare i risultati.

Da queste considerazioni si può dedurre che il limite maggiore della prova è legato alle caratteristiche costruttive e strutturali tipiche delle murature storiche (dimensioni variabili degli elementi, porosità, presenza di fessure e di superfici di interfaccia tra materiali differenti).⁵⁴

Nonostante la prova fornisca risultati prettamente qualitativi, consente una valutazione di massima della qualità e dello stato di conservazione della muratura.

Alle modalità sopra citate si aggiunge la tomografia sonora (fig.3.2d) che si avvale, per l'acquisizione dei dati, di una normale strumentazione sonora.

Nella tomografia sonora si considerano, per ogni punto sorgente del segnale, un numero discreto di punti riceventi a formare un ventaglio di percorsi ideali del segnale trasmesso, diversamente orientati rispetto alla direzione del fronte d'onda iniziale del segnale registrando il tempo di volo di ogni percorso.

I segnali acustici hanno la tendenza a viaggiare meglio e più velocemente in materiali maggiormente densi dunque la velocità del segnale tenderà ad essere maggiore in regioni di materiale integro, e, in presenza di vuoti, il fronte d'onda aggira la cavità allungando il proprio percorso e dando luogo a velocità misurate apparentemente inferiori.

Utilizzando i valori misurati dei tempi di volo si può ricostruire la distribuzione delle velocità sulla sezione considerandola costante in ogni singolo pixel che non è altro che il risultato della suddivisione della sezione tramite una maglia regolare (fig.3.3).

L'informazione che si ottiene è un valore di velocità estesa ad un'area di rilievo.

⁵⁴ Rosato L. (2014), *Sviluppo di un nuovo software di elaborazione tomografica per l'applicazione del metodo di indagine sonora per la diagnosi strutturale delle murature esistenti*, Tesi di laurea, Rel. Maria Rosa Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2013-2014

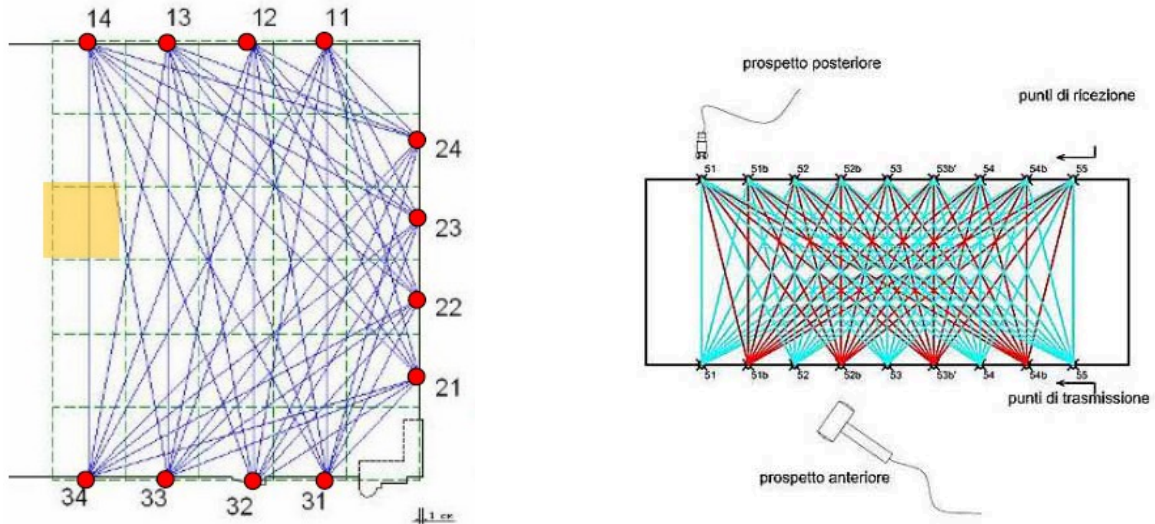


Figura 3.3 - schema di funzionamento della prova tomografica, il quadrato evidenziato indica il pixel di elaborazione

3.1.2 Localizzazione ed esecuzione

Villa Diomede, come esposto al capitolo 2, presenta murature composte da materiali eterogenei e tecniche costruttive differenti. La scelta delle posizioni di prova è stata guidata dalla necessità di individuare e qualificare queste diverse tipologie murarie a supporto delle ipotesi proposte in merito alle fasi di costruzione del manufatto.

L'individuazione dei punti in cui si sono svolte le prove soniche sono state influenzate dall'accessibilità e dalla regolarità superficiale, evitando ove possibile le zone con debolezze o distacchi di intonaco che avrebbero potuto alterare la corretta trasmissione dell'onda. Tale scelta corrisponde al primo passaggio delle fasi di esecuzione della prova.

A seconda dello stato di conservazione della muratura, della presenza o meno di un rivestimento e dal tipo di materiale che lo compone si sono scelte sei posizioni per su cui effettuare le prove soniche dirette (S1, S2, S3, S4, S5, S6) e due posizioni per le tomografie, disposte una verticale e l'altra in orizzontale (T1, T2).

La seguente immagine mette in evidenza il loro collocamento (fig.3.4).



Figura 3.4 - localizzazione delle prove soniche

Le prove S1 e S3 consentono di valutare le caratteristiche murarie dei paramenti che dividono rispettivamente le stanze 8-9 e 8-13; la prova S2 riguarda uno dei paramenti più antichi presenti nella Villa, risalente alla seconda fase costruttiva individuata dalle ricerche archeologiche.

La prova S4 valuta infine il paramento adiacente la porta d'ingresso, realizzato in concomitanza con l'apertura dell'ingresso dopo le modifiche occorse alla Villa in conseguenza dell'apertura di Via delle Tombe.

Particolarmente interessanti risultano le prove S5 e S6 che indagano il muro sud del livello del giardino, realizzato in concomitanza con il portico che venne successivamente tamponato, probabilmente in seguito al terremoto del 63 d.C. La prova S5 indaga una porzione comprendente una tipologia muraria risalente alla fase di costruzione del portico ed una di tamponamento, realizzate rispettivamente in tufo grigio e tufo giallo, permettendo di rilevare le differenze di velocità tra le due. La prova S6 valuta invece la qualità del maschio murario dello stesso muro a sud del quadriportico.

Le tomografie T1 e T2 vengono realizzate su due pilastri non intaccati da interventi moderni, per valutare le caratteristiche offerte dalla tipologia romana e fornire indicazioni del materiale costituente il nucleo. In particolare la tomografia T1 viene effettuata su un pilastro del portico sud costituito da elementi squadrati di tufo grigio, la tomografia T2 su un pilastro del portico est che presenta elementi in tufo grigio e tufo giallo con listature in tegole di laterizio.

Una volta individuate le posizioni delle prove si è proceduto con la creazione di una maglia che meglio si adattasse al pannello murario delle relative prove concretizzata con l'attribuzione di un nome identificativo ad ogni punto costituente tale maglia in entrambe le facce del pannello garantendone l'ortogonalità dei punti corrispondenti. I punti della griglia sono composti da due cifre, una relativa alla riga e una relativa alla colonna e il primo punto (1.1) costituisce il riferimento principale per ogni acquisizione (fig.3.5). Le tabelle 3.2-3.3 riassumono le caratteristiche dimensionali di tali maglie: per le prove soniche dirette (indicate con la lettera S) vengono riportati lo spessore murario, la dimensione del pannello, il passo della griglia e lato del martello; per le tomografie (indicate con la lettera T) si riporta la dimensione della sezione, il passo dei punti, orientamento (verticale o orizzontale) e il lato del martello.

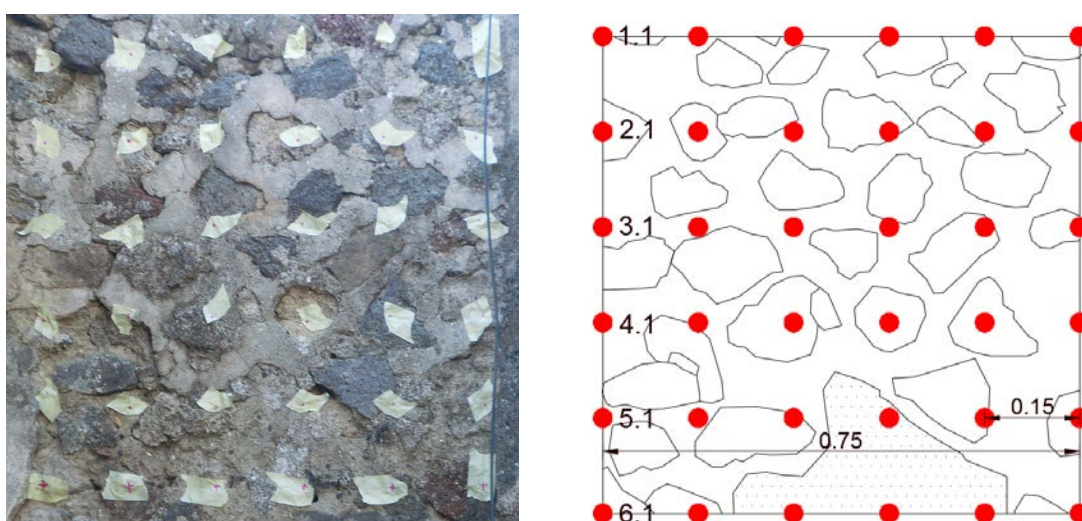


Figura 3.5 - Esempio di suddivisione del pannello murario, prova S4

Tabella 3.2 - schematizzazione dei pannelli murari, prove soniche dirette

Prova sonica diretta	Spessore pannello	Dimensione pannello	Passo della griglia dei punti	Lato martello
S1	40 cm	100 x 100 cm	20 x 20 cm	Ambiente 8
S2	40 cm	100 x 100 cm	20 x 20 cm	Ambiente 5
S3	40 cm	100 x 60 cm	20 x 20 cm	Ambiente 8
S4	42 cm	75 x 75 cm	15 x 15 cm	Ambiente 5
S5	60 cm	60 x 30 cm	10 x 10 cm	Ambiente 63
S6	60 cm	60 x 60 cm	15 x 15 cm	Ambiente 63

Tabella 3.3 - schematizzazione dei pannelli murari, tomografie

Prova tomografica	Orientamento	Lungh/dim sezione	Passo dei punti	N° acquisizioni
T1	Orizzontale	60x40 cm	15 cm	Unica acq: est
T2	Verticale	162 cm	20 cm	1 acq: sud
				2 acq: est
				3 acq: nord

La fase successiva riguarda la preparazione dell'attrezzatura necessaria all'esecuzione della prova e il collegamento degli accelerometri ai canali di acquisizione del PXI.

La fase vera e propria di acquisizione dei dati ha richiesto la presenza di almeno tre persone: la prima con il compito di assicurare e mantenere fissa la posizione dell'accelerometro nel punto corrispondente nel lato opposto della muratura su cui la seconda persona effettuava il colpo e una terza gestire i dati mediante l'equipaggiamento composto dal PXI e dal software SonichelRSnew.

Al fine di ottenere un segnale "pulito" l'esecuzione della prova ha richiesto dei colpi secchi evitando le vibrazioni del martello dopo l'impatto con la muratura, il tutto mantenendo gli accelerometri il più possibile aderenti alla superficie. Il PXI, ovvero l'unità centrale di acquisizione, restituisce ad ogni colpo del martello due curve sovrapposte: una indica il segnale lanciato dal martello, l'altro il segnale ricevuto dall'accelerometro (fig.3.6).

È da sottolineare che lo strato superficiale della muratura presente nella Villa non presentava le condizioni ottimali e ha costretto a ripetere le operazioni di acquisizione finché non si fossero ottenute tre acquisizioni ritenute attendibili in ciascun punto della maglia.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata mediante l'utilizzo del software sviluppato dall'Università degli studi di Padova, SonichelRSnew, e Surfer 11 in grado di restituire una immagine di distribuzione delle velocità. Il primo, permette di riaprire i file salvati dall'acquisizione e restituire a schermo i due segnali, emittente e ricevente. A questo punto, si individuano i punti di partenza del segnale del martello e quello dell'accelerometro attraverso lo spostamento di due barre verticali che corrispondono all'intervallo di tempo intercorso tra l'istante di partenza del segnale dal martello all'istante in cui questo

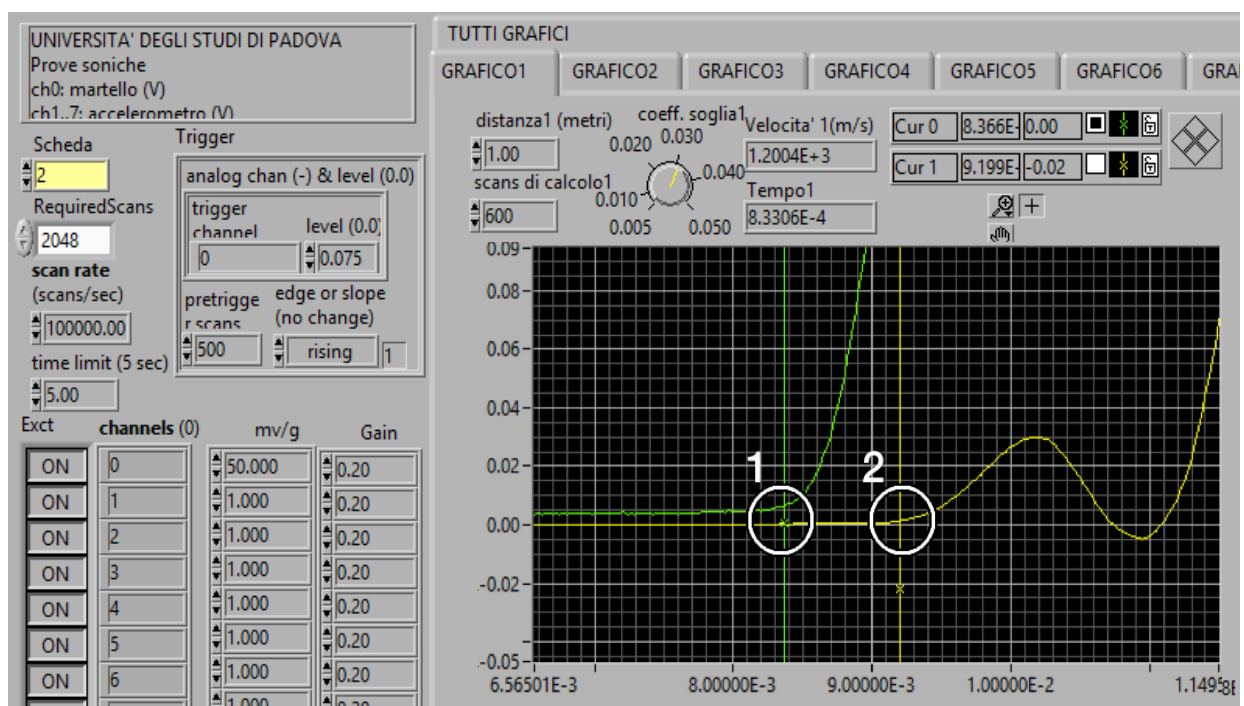


Figura 3.6 - Schermata software SonichelRSnew

viene ricevuto dall'accelerometro. Questo dato viene ricavato dal programma anche in forma numerica e dopo aver copiato il valore in una predisposta tabella in Excel, verrà calcolata la media tra le tre acquisizioni di ogni punto (fig.3.6). Lo spessore del muro era noto avendolo misurato in sito per cui è facile ottenere la velocità sonica di trasmissione del segnale secondo il noto concetto espresso al capitolo precedente richiamante la semplice relazione fra spazio, velocità e tempo. La media di tutte le velocità rilevate determinerà la velocità relativa all'intero pannello (fig.3.7).

Prova sonica S4 - Zona ingresso Villa Diomede							TABELLA SURFER				
Punto #	ID	BATTUTA			sp 0.42		Velocità [m/s]	path	X (grid) [m]	Y (grid) [m]	Z (vm) [m/s]
		a [sec]	b [sec]	c [sec]	media [sec]	dev [sec]					
1	1.1	7.90E-04	7.57E-04	7.75E-04	7.74E-04	1.34E-05	542.71	1.10	0.00	0.75	542.71
2	1.2	1.41E-03	1.21E-03	1.19E-03	1.27E-03	9.87E-05	331.12	1.20	0.15	0.75	331.12
3	1.3	7.81E-04	8.21E-04	8.24E-04	8.09E-04	1.95E-05	519.26	1.30	0.30	0.75	519.26
4	1.4	1.06E-03	1.03E-03	1.20E-03	1.10E-03	7.27E-05	383.18	1.40	0.45	0.75	383.18
5	1.5	9.07E-04	1.09E-03	9.28E-04	9.74E-04	7.96E-05	431.43	1.50	0.60	0.75	431.43
6	1.6	6.36E-04	7.46E-04	7.82E-04	7.21E-04	6.21E-05	582.34	1.60	0.75	0.75	582.34
7	2.1	1.52E-03	1.56E-03	1.26E-03	1.44E-03	1.34E-04	291.02	2.10	0.00	0.60	291.02
8	2.2	9.38E-04	1.04E-03	9.35E-04	9.72E-04	4.95E-05	432.32	2.20	0.15	0.60	432.32
9	2.3	9.36E-04	8.76E-04	1.03E-03	9.47E-04	6.34E-05	443.32	2.30	0.30	0.60	443.32
10	2.4	9.16E-04	9.01E-04	1.10E-03	9.71E-04	8.89E-05	432.34	2.40	0.45	0.60	432.34
11	2.5	7.14E-04	7.05E-04	7.43E-04	7.21E-04	1.64E-05	582.68	2.50	0.60	0.60	582.68
12	2.6	9.37E-04	9.80E-04	1.10E-03	1.01E-03	6.80E-05	417.80	2.60	0.75	0.60	417.80
13	3.1	9.20E-04	1.04E-03	9.36E-04	9.64E-04	5.08E-05	435.78	3.10	0.00	0.45	435.78
14	3.2	1.05E-03	1.08E-03	1.21E-03	1.11E-03	6.69E-05	376.91	3.20	0.15	0.45	376.91
15	3.3	1.03E-03	9.41E-04	9.77E-04	9.83E-04	3.77E-05	427.09	3.30	0.30	0.45	427.09
16	3.4	1.49E-03	1.52E-03	1.52E-03	1.51E-03	1.21E-05	277.96	3.40	0.45	0.45	277.96
17	3.5	1.19E-03	1.22E-03	1.33E-03	1.25E-03	5.84E-05	337.13	3.50	0.60	0.45	337.13
18	3.6	1.99E-03	1.86E-03	1.82E-03	1.89E-03	7.00E-05	222.07	3.60	0.75	0.45	222.07
19	4.1	1.18E-03	1.04E-03	1.23E-03	1.15E-03	8.32E-05	365.16	4.10	0.00	0.30	365.16
20	4.2	1.44E-03	1.38E-03	1.45E-03	1.42E-03	3.09E-05	294.81	4.20	0.15	0.30	294.81
21	4.3	1.86E-03	1.65E-03	1.84E-03	1.79E-03	9.39E-05	235.19	4.30	0.30	0.30	235.19
22	4.4	2.06E-03	1.74E-03	1.92E-03	1.91E-03	1.30E-04	220.31	4.40	0.45	0.30	220.31
23	4.5	1.49E-03	1.58E-03	1.52E-03	1.53E-03	3.58E-05	274.87	4.50	0.60	0.30	274.87
24	4.6	1.73E-03	1.65E-03	1.48E-03	1.62E-03	1.06E-04	259.06	4.60	0.75	0.30	259.06
25	5.1	1.90E-03	1.94E-03	1.86E-03	1.90E-03	3.37E-05	220.96	5.10	0.00	0.15	220.96
26	5.2	1.88E-03	1.91E-03	1.89E-03	1.89E-03	1.06E-05	221.86	5.20	0.15	0.15	221.86
27	5.3	1.52E-03	1.32E-03	1.32E-03	1.39E-03	9.48E-05	302.99	5.30	0.30	0.15	302.99
28	5.4	1.12E-03	1.13E-03	1.18E-03	1.14E-03	2.82E-05	367.59	5.40	0.45	0.15	367.59
29	5.5	2.12E-03	2.40E-03	2.08E-03	2.20E-03	1.43E-04	191.00	5.50	0.60	0.15	191.00
30	5.6	1.62E-03	1.38E-03	1.38E-03	1.46E-03	1.15E-04	288.17	5.60	0.75	0.15	288.17
31	6.1	1.45E-03	1.42E-03	1.49E-03	1.45E-03	2.74E-05	288.95	6.10	0.00	0.00	288.95
32	6.2	1.65E-03	1.54E-03	1.59E-03	1.60E-03	4.75E-05	263.14	6.20	0.15	0.00	263.14
33	6.3	1.65E-03	1.64E-03	1.65E-03	1.65E-03	8.08E-06	255.10	6.30	0.30	0.00	255.10
34	6.4	2.45E-03	1.71E-03	1.93E-03	2.03E-03	3.09E-04	207.05	6.40	0.45	0.00	207.05
35	6.5	1.72E-03	1.91E-03	1.66E-03	1.77E-03	1.05E-04	237.95	6.50	0.60	0.00	237.95
36	6.6	1.17E-03	1.33E-03	1.25E-03	1.25E-03	6.62E-05	335.78	6.60	0.75	0.00	335.78

Velocità media	342	m/s
Dev. Standard	107	m/s
CoV	31.28%	

Figura 3.7 - Tabella delle velocità risultanti dall'elaborazione delle acquisizioni

L'ultima fase di elaborazione è la creazione di una tabella in cui le coordinate orizzontali, verticali e la velocità media di ogni punto corrispondono rispettivamente ai valori distribuiti negli assi X,Y,Z.

Per ottenere una restituzione grafica delle distribuzioni delle velocità si inseriscono tali coordinate in una apposita griglia del software Surfer11 in grado di interpolare i dati inseriti. Il risultato è un'immagine con gradazione di colori differenti relativa ai valori di velocità. Si è preferito utilizzare la stessa scala cromatica per la rappresentazione delle velocità di tutte le elaborazioni considerando un minimo di 340m/s, velocità di propagazione dell'onda nell'aria al di sotto del quale non si può fisicamente scendere, e un massimo di 2000m/s, considerata come soglia cui nessuna delle murature indagate è capace di superare. Attraverso questa uniformità della scala del colore per la rappresentazione è stato possibile confrontare i risultati delle diverse prove (fig.3.8).

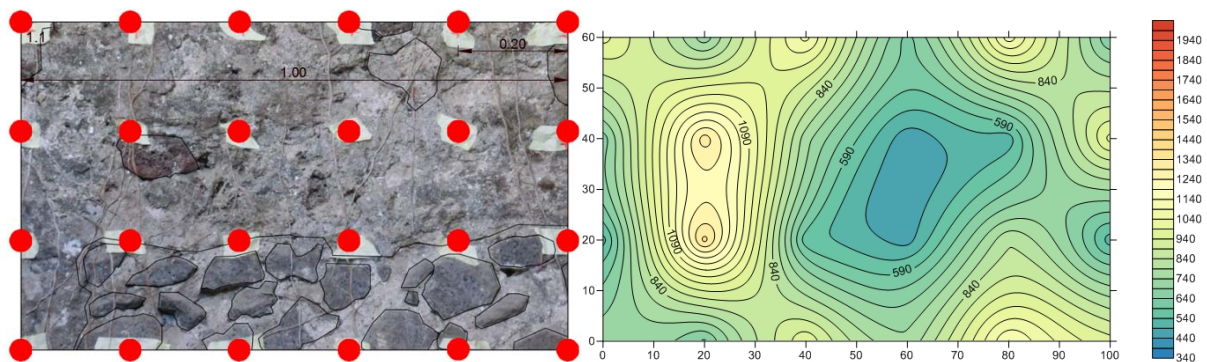


Figura 3.8 - esempio di distribuzione delle velocità elaborate dal software Surfer11, prova S3

Per quanto riguarda le tomografie, le fasi di esecuzione ed acquisizione sono le stesse con la sola differenza che il segnale parte da un punto (martello) e viene ricevuto ed acquisito contemporaneamente in più punti corrispondenti al posizionamento simultaneo degli accelerometri. I punti di acquisizione restano invariati mentre con il martello si procede battendo nei punti successivi della riga o colonna sulla quale si sta effettuando la prova. Per ricavare le velocità di ogni percorso martello-accelerometro si è fatto uso di SonicelRSnew schematizzando i tempi acquisiti in apposite tabelle create in Excel simili a quelle utilizzate per le prove soniche dirette. I successivi passi di elaborazione hanno richiesto l'utilizzo del software TomoGrafiaNew sviluppato dall'Università degli Studi di Padova in grado di interpolare i dati acquisiti e correlarli alla maglia suddivisa in "pixel". Quest'ultimo, partendo dall'inserimento dei dati geometrici della sezione e della maglia di acquisizione, calcola i termini della matrice Ray Tracing ovvero una matrice che fornisce la distribuzione delle velocità riferite ad ogni pixel della maglia. Successivamente, mediante lo stesso software si ricavano le coordinate X,Y,Z necessarie per la restituzione grafica effettuata sempre tramite Surfer11.

3.1.3 Risultati e osservazioni

Entro i limiti sopra esposti di interpretazione dei risultati delle prove soniche, è possibile definire in modo approssimato, alcuni range di variabilità delle velocità registrate attraverso le murature, attribuibili a condizioni buone (indicativamente maggiori di 2500 m/s), discrete (tra 1200 e 2500 m/s), o cattive (minori di 1200 m/s). Per il tipo di strumentazione adottata nel contesto tipologico analizzato, velocità superiori ai 3000 m/s o inferiori a quella di trasmissione delle onde nell'aria (circa 340 m/s) non si considerano attendibili.

In generale, i risultati delle prove effettuate a Villa Diomede corrispondono a velocità mediamente basse, imputabili ad una scarsa qualità delle murature ed influenzata dalle condizioni di degrado, in molti casi particolarmente estese o gravi: esempi significativi sono la S1, S2, S5, T1 e T2.

A livello del piano terra, per la prova S1, muratura costituita da conci sbalzati eterogenei in forma e dimensione con legante generalmente incoerente, si sono registrate velocità massime di 790 m/s (figg. 3.9-3.10).

La prova S2, realizzata su una parete costituita da elementi resistenti prevalentemente calcarei e qualche elemento puntuale in pietra vulcanica e laterizio, ha fatto registrare i risultati migliori con velocità che raggiungono i 1200 m/s, risultato accettabile dato il buon stato di conservazione del legante (figg.3.9-3.11).

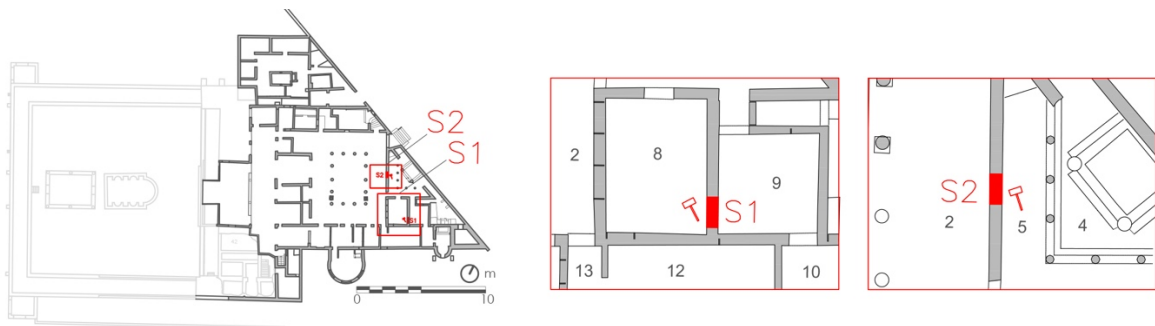


Figura 3.9 - localizzazione prova sonica S1 e S2

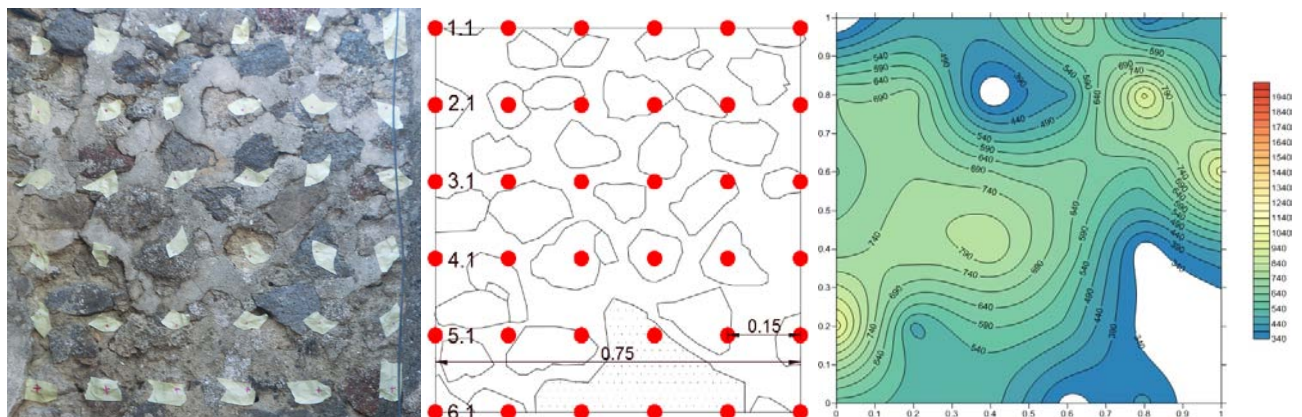


Figura 3.10 - risultati della prova sonica S1

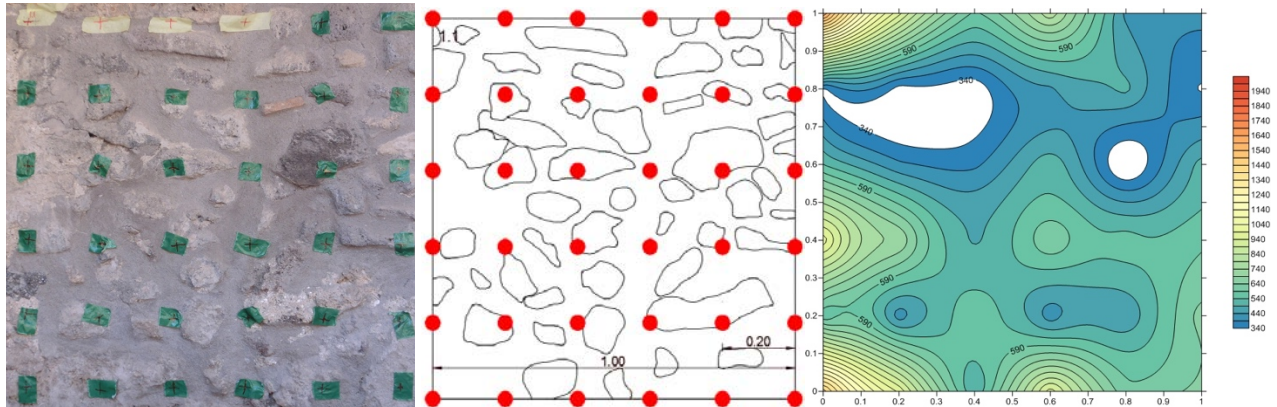


Figura 3.11 - risultati della prova sonica S2

A livello del porticato la prova S5 è risultata interessante per la particolarità di localizzazione comprendente sia il maschio murario composto da elementi resistenti regolari in tufo grigio sia il tamponamento in opus reticulatum di tufo giallo. Per la zona interessata dal tamponamento si sono registrati valori molto bassi, inferiori a 340m/s, che in si sono evitati di illustrare perché non attendibili. Tale risultato, comunque, è sostenuto dall' esame visivo in sito riscontrando l'effettiva decoesione degli elementi resistenti. Valori lievemente superiori si verificano nel maschio murario e dall'elaborazione si evincono le scarse qualità murarie mantenendo tuttavia dei valori molto bassi della media avvicinandosi alla velocità di propagazione nell'aria (figg.3.12-3.13).

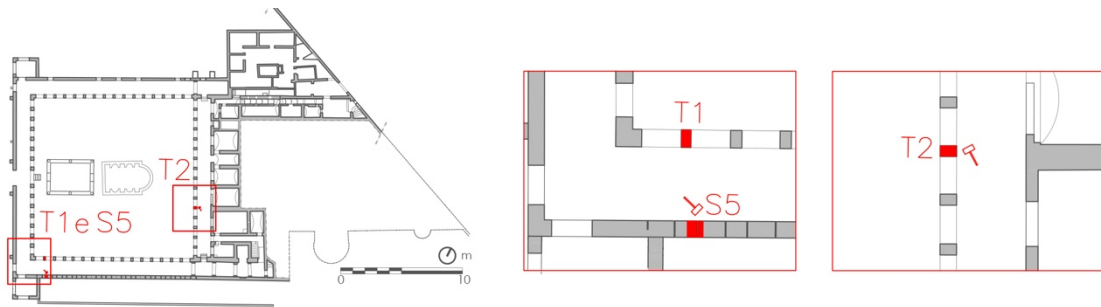


Figura 3.12 - localizzazione prove S5, T1 e T2

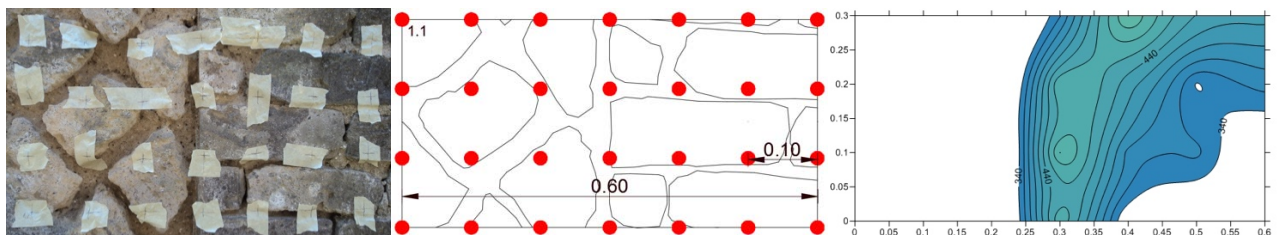


Figura 3.13 - risultati della prova sonica S5

L'applicazione delle tomografie alle sezioni dei pilastri prefigge di valutare la qualità del suo nucleo più interno.

La tomografia T1 (sezione orizzontale con quattro lati di illuminazione) ha evidenziato come la tecnica costruttiva del paramento superficiale non prosegue all'interno del pilastro che esternamente si presenta composto da elementi relativamente regolari e, in determinati punti, da un legante polverizzato. Le velocità d'onda di circa 1200 m/s dei lati sud e ovest contro i 740 m/s della parte interna rende plausibile una ipotesi di un nucleo più debole e incoerente (figg. 3.14-3.15).

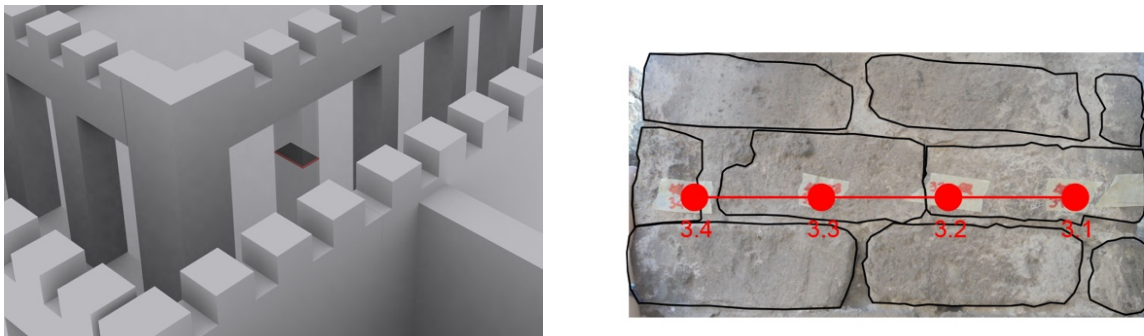


Figura 3.14 – localizzazione della prova T1 e individuazione dei punti della maglia

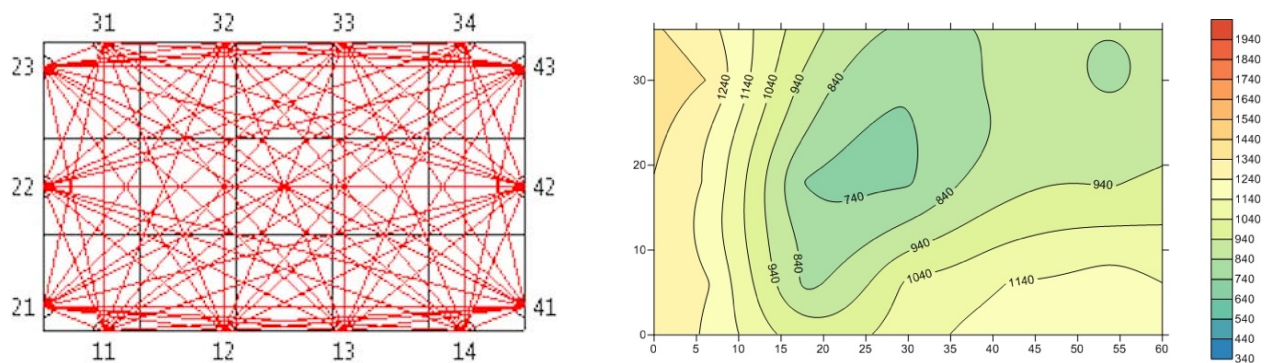


Figura 3.15 – tracciati tomografici e restituzione grafica delle velocità della prova T1

La tomografia T2 (sezione verticale con due lati di illuminazione) è stata effettuata sul pilastro numero 58 che presenta, oltre agli elementi resistenti di tufo grigio e giallo, ricordi in tegole in laterizio. I risultati di questa prova descrivono una migliore caratterizzazione meccanica della porzione listata che raggiunge i 900 m/s, valore sopra la media del resto della struttura che si attesta sui 700 m/s (fig.3.16).

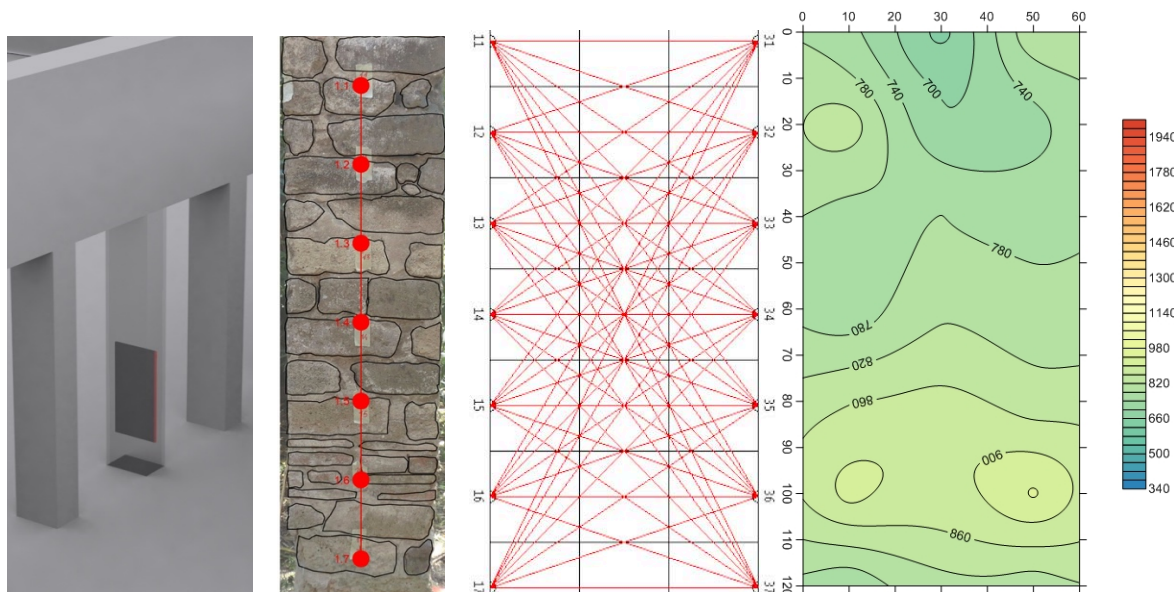


Figura 3.16 – schemi di acquisizione, tracciati tomografici e restituzione grafica delle velocità della prova T2

Si riportano in allegato C la descrizione di dettaglio per ciascuna prova eseguita. Ogni scheda è composta dalla localizzazione della prova, la fotografia del paramento murario affiancata dal ridisegno in AutoCad degli elementi che lo costituiscono con sovrapposti la posizione degli accelerometri e le distanze principali della maglia di acquisizione.

Nella parte più inferiore della scheda sono riportate l'immagine dell'interpolazione delle velocità ricavata tramite Surfer 11 e la sua sovrapposizione al disegno in 2D. Ad ogni scheda, inoltre, è associato un commento in merito al relativo risultato.

3.2 Prove endoscopiche

3.2.1 Procedura e strumentazione

Le indagini endoscopiche permettono il rilievo stratigrafico della muratura e l'individuazione di eventuali vuoti o cavità all'interno dei corpi murari. Con la loro applicazione si possono ottenere utili informazioni per localizzare e intercettare la presenza di anomalie o problematiche di diversa natura in elementi difficilmente accessibili e ispezionabili.

L'endoscopia può essere eseguita praticando un foro di piccolo diametro nei punti da indagare oppure sfruttando cavità già presenti. In quest'ultimo caso, in presenza di fessure o distacchi sufficientemente ampi si può ricorrere all'utilizzo dell'endoscopio flessibile, dotato di fibra ottica, che ha la particolarità di adattarsi al cammino del foro. Il vantaggio nell'uso di questo endoscopio consiste nella possibilità di raggiungere le zone da indagare anche lungo percorsi tortuosi e di poter fare ispezioni da diverse posizioni grazie alla mobilità della parte terminale che viene comandata dall'esterno.

All'endoscopio può essere applicata una macchina fotografica o una videocamera che consente l'archiviazione della prova eseguita.

Le endoscopie, effettuate dopo l'esecuzione di interventi di consolidamento che modificano la composizione interna della muratura, quali ad esempio le iniezioni con miscele leganti, possono fornire un'indicazione sulla penetrazione e diffusione del materiale consolidante all'interno della muratura stessa, e quindi sulla qualità d'esecuzione ed efficacia dell'intervento.

Nel caso di Villa Diomede, le prove endoscopiche sono state utilizzate in modo diffuso e non distruttivo, indagando fori ed aperture esistenti, in zone accessibili e significative dal punto di vista delle tipologie murarie presenti, per verificare i risultati delle altre prove eseguite ed estenderne la validità alle altre parti del complesso.

3.2.2 Localizzazione ed esecuzione

Sono state eseguite tre endoscopie a livello della strada (piano terra) e tredici a livello del giardino (piano porticato), di cui nove relative alle colonne del porticato e quattro al muro d'ambito sud. Le posizioni delle prove endoscopiche per i due livelli sono riportate rispettivamente in fig. 3.17 e fig.3.18.

La distinta della descrizione delle posizioni ed un esempio di immagine significativa rilevata dallo strumento sono riportate in modo congiunto in Tab.3.4 dove risulta già evidente la situazione di discontinuità del tessuto murario.



Figura 3.17 – localizzazione prove endoscopiche, piano terra

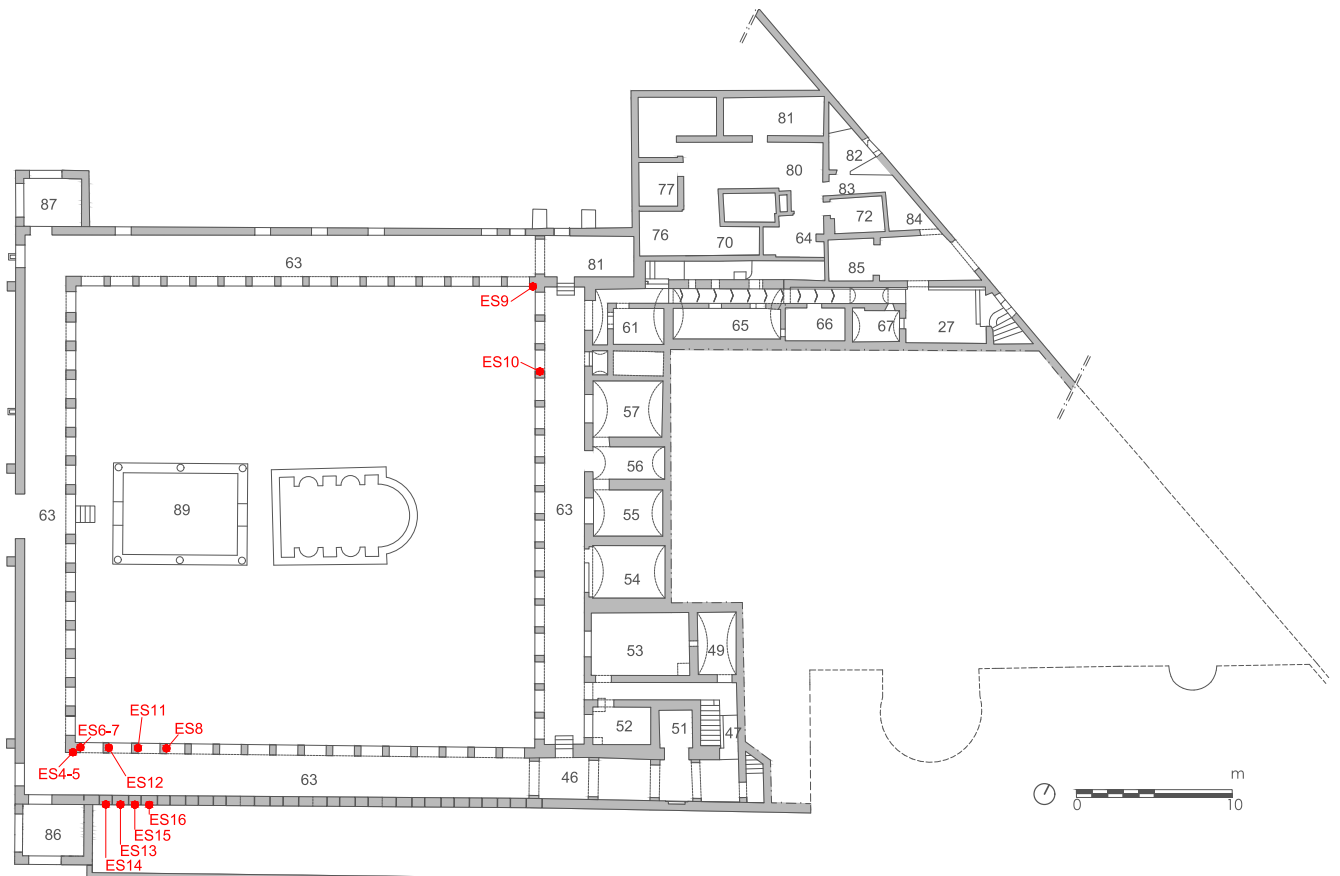



Figura 3.18 – Localizzazione prove endoscopiche, livello del porticato









3.2.3 Risultati ed osservazioni



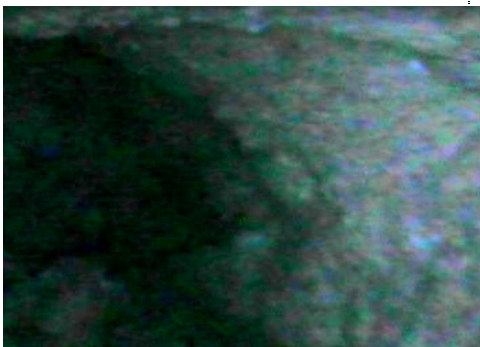




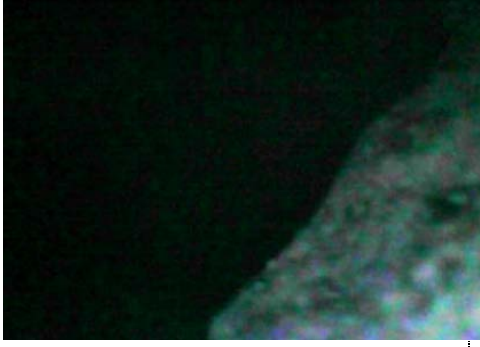
Le indagini endoscopiche si sono rilevate particolarmente significative in relazione ai pilastri del portico e nel muro d'ambito meridionale, in sovrapposizione alle prove soniche eseguite.







Si confermano, infatti, i risultati delle prove soniche eseguite sui tamponamenti del muro d'ambito: le cavità visibili risultano passanti, e l'endoscopio registra un nucleo gravemente decoeso. Le prove su pilastri segnalano cavità che proseguono fino all'interno del nucleo, il quale presenta grossi agglomerati di legante, a conferma di una consistenza diversa dall'orditura muraria superficiale del pilastro.

Tabella 3.4 - Identificazione, ubicazione, esecuzione e risultati delle prove endoscopiche

Identificazione e Localizzazione		Immagine	
ES1	Cavità tra stanza 2 e 5		
ES2	Cavità tra stanza 8 e 12		
ES3	Cavità tra stanza 8 e 9		

ES4	Pilastro 16		
ES5	Pilastro 16		
ES6	Pilastro 16		
ES7	Pilastro 16		
ES8	Pilastro 14		

ES9	Pilastro 47		
ES10	Pilastro 50		
ES11	Pilastro 13		
ES12	Pilastro 15		
ES13	Muro d'ambito - Sud		

ES14	Muro d'ambito - Sud	 A photograph showing a section of a stone wall. The wall is composed of irregular, light-colored stones. A hand is visible on the right side, holding a white hand-held scanner against the wall. A black cable is attached to the scanner.	 A thermal image of the wall shown in the adjacent photograph. The image displays a color-coded temperature map, with warmer areas appearing in shades of red and orange, and cooler areas in shades of blue and green.
ES15	Muro d'ambito - Sud	 A photograph showing a section of a stone wall, similar to ES14. A hand is visible on the right side, holding a white hand-held scanner against the wall. A black cable is attached to the scanner.	 A thermal image of the wall shown in the adjacent photograph. The image displays a color-coded temperature map, with warmer areas appearing in shades of red and orange, and cooler areas in shades of blue and green.
ES16	Muro d'ambito - Sud	 A photograph showing a section of a stone wall, similar to the previous two. A hand is visible on the right side, holding a white hand-held scanner against the wall. A black cable is attached to the scanner.	 A thermal image of the wall shown in the adjacent photograph. The image displays a color-coded temperature map, with warmer areas appearing in shades of red and orange, and cooler areas in shades of blue and green.

3.3 Prove radar

3.3.1 Procedure e strumentazione

Sono state effettuate anche delle indagini Georadar su alcuni degli ambienti interni ed esterni alla Villa, sulla base delle indicazioni storico-archeologiche fornite a priori, allo scopo di validare ed arricchire di ulteriori elementi le ipotesi di trasformazione e di modifica della struttura che hanno interessato la Villa nelle differenti fasi. I risultati esposti di seguito costituiscono un primo interessante spunto di riflessione per la programmazione di future ed auspicabili campagne di indagine, che possono contribuire, in modo non invasivo a ricostruire la storia di questo edificio e della sua evoluzione.

Di seguito verranno illustrati brevemente i principi della tecnica di misura georadar, per consentire un'interpretazione il più possibile univoca e verosimile delle anomalie riscontrate nei dati, potenzialmente indicative di preesistenze al di sotto delle attuali strutture nelle porzioni indagate.

Con il termine Georadar o GPR (Ground Penetrating Radar) si indica il metodo di indagine geofisico basato sulla propagazione e la riflessione di onde elettromagnetiche ad alta frequenza (comprese tra 10 MHz e 2 GHz), le quali vengono emesse da un'antenna trasmittente e rilevate da un'antenna ricevente. L'energia elettromagnetica viene immessa nel sottosuolo sotto forma di impulsi ed in funzione delle caratteristiche elettromagnetiche del mezzo incontrato, questa si propaga fino ad essere riflessa in corrispondenza delle interfacce di separazione tra mezzi aventi caratteristiche elettriche differenti, ossia in presenza di differenze di impedenza elettromagnetica (ad esempio in corrispondenza di oggetti metallici sepolti in un terreno o di interfacce litostratigrafiche). Il segnale riflesso, come detto, viene captato da una antenna ricevente, la quale può essere fisicamente accoppiata con l'antenna trasmittente (configurazione monostatica) oppure essere separata da questa (configurazione bistatica).

La velocità di propagazione delle onde GPR (v) dipende dalla permittività dielettrica relativa del mezzo ϵ_r , entro cui il segnale si propaga:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

dove c è la velocità di propagazione delle onde EM nel vuoto, ovvero:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 0.3 \frac{\text{m}}{\text{ns}}$$

dove ϵ_0 è la permittività dielettrica del vuoto e μ_0 è la permittività magnetica del vuoto. Dalla prima equazione si deduce che v sarà sempre inferiore o uguale a c e sarà tanto più piccola quanto maggiore è la permittività dielettrica relativa del mezzo:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

(ϵ è la permittività dielettrica assoluta del mezzo).

La permittività dielettrica relativa ϵ_r varia tra 1 (in aria) e 81 (in acqua). Per i materiali geologici più comuni la ϵ_r è compresa tra 3 e 30, pertanto v può variare fra 0.06 e 0.175 m/ns.

Il contenuto idrico ha un effetto preponderante sulla ϵ_r del materiale.

La lunghezza d'onda del segnale GPR è espressa dalla formula $\lambda = v/f$. Nel caso di un'antenna con frequenza centrale $f=100$ MHz, considerato un mezzo geologico con velocità $v = 0.1$ m/ns, la lunghezza d'onda risulta pari a 1 m e teoricamente, lavorando da superficie in configurazione monostatica (detta anche modalità in riflessione), la risoluzione è pari a 1/4 della lunghezza d'onda, ossia 25 cm.

Dalla permittività dielettrica dipende anche il coefficiente di riflessione del GPR. La riflessione dell'impulso radar avviene alle interfacce fra mezzi che hanno impedenza elettromagnetica (Z) diversa:

$$Z = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{j\sigma + \epsilon\omega}}$$

(ω è la frequenza, j è l'unità complessa) che per bassi valori di conduttività σ si può approssimare:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

Il coefficiente di riflessione per incidenza normale si definisce come:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

Da cui per mezzi non magnetici ($\mu_0 = \mu_1 = \mu_2$) si ha:

$$R = \frac{(\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2})}{(\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2})}$$

La marcata dipendenza del comportamento del segnale GPR dalle caratteristiche elettriche dei materiali si riflette tuttavia anche nell'applicabilità del metodo. Il GPR non funziona infatti molto bene a contatto con sistemi eccessivamente conduttivi (es. suoli saturi) e su suoli la cui percentuale di limi e argille è relativamente alta. La presenza di materiali molto conduttivi in superficie può infatti abbattere l'ampiezza

del segnale iniziale sino al 37%, con conseguente attenuazione dello stesso all'aumentare della profondità. In generale bisogna tener conto del fatto che l'accoppiamento dell'antenna col suolo produce una distorsione del segnale con l'abbattimento delle alte frequenze che in pratica si traduce in un "allungamento" del segnale e una corrispondente perdita di risoluzione teorica.

Il Georadar è però un ottimo strumento per localizzare oggetti metallici, la cui presenza, caratterizzata da una marcata differenza di impedenza elettromagnetica rispetto all'ambiente ospitante, che si traduce sul radargramma (sezione bidimensionale radar) in una marcata ampiezza del segnale riflesso.

La profondità di investigazione del GPR è inversamente proporzionale alla frequenza dell'antenna utilizzata, mentre il dettaglio dell'indagine (risoluzione) è proporzionale alla frequenza dell'antenna. In base alle frequenze delle antenne utilizzate, le applicazioni Georadar si possono suddividere in due grosse categorie: la prima riguarda le prospezioni geologiche e prevede l'utilizzo di antenne con frequenze comprese tra 10 MHz e 400 MHz, adatte, quindi, ad esplorazioni più profonde o che non richiedono particolare dettaglio. La seconda categoria riguarda invece le indagini GPR poco profonde, pertanto prevedono l'utilizzo di antenne con frequenze comprese tra 400 MHz e 2 GHz, per problemi ingegneristici, l'archeologia, i beni culturali e per tutte le indagini che necessitano di un'elevata risoluzione.

Dal tipo di frequenza utilizzata dipendono inoltre parametri quali l'attenuazione e la dispersione del segnale, motivo per cui, per un corretto utilizzo del Georadar è necessario programmare le misure in base ai fattori che entrano in gioco in ogni specifica campagna di misura. Una dettagliata definizione preliminare del problema sta, infatti, alla base di una corretta impostazione dell'indagine e di una buona riuscita della stessa.

Il modo più comune di acquisire i dati GPR da superficie è il così detto common-offset single-fold, detto anche rilievo per riflessione di tipo monostatico, che consiste nello spingere o trascinare sul suolo una coppia di antenne (trasmittente/ricevente) o il box che le contiene, mantenendo costante la distanza reciproca tra trasmittente e ricevente. Il risultato dell'acquisizione è il cosiddetto radargramma, ossia una sezione spazio-tempo a due vie (andata e ritorno del segnale) relativa alla zona indagata.

I corpi e le discontinuità rappresentati in un radargramma hanno proprietà geometriche riconducibili solo in parte alla forma reale delle strutture sepolte. Al fine di evidenziare le riflessioni di interesse ed interpretare correttamente le reali forme ad esse associate, la profondità e le caratteristiche delle strutture investigate, dopo l'acquisizione è necessario effettuare un processing dei dati, che consente inoltre di eliminare o, quantomeno, ridurre il rumore sul segnale ed ottenere una più chiara lettura dei cosiddetti orizzonti di interesse. La fase di processing dei dati può comportare semplici operazioni di normalizzazione e filtraggio, mentre nei casi più complessi è necessario applicare particolari filtri ed algoritmi, con operazioni che richiedono una notevole esperienza da parte dell'operatore.

Attualmente esistono in commercio sistemi georadar che consentono di registrare e produrre, con un'unica acquisizione, due radargrammi riferibili ad altrettante profondità di investigazione e corrispondente bassa o alta risoluzione. Lo scopo principale di questi sistemi di nuova generazione è infatti quello di

cercare di superare un limite intrinseco del metodo GPR, il quale generalmente con la scelta di una sola antenna per ciascuna prospezione implica un compromesso tra massima profondità di investigazione e risoluzione ottenibili

3.3.2 Localizzazione ed esecuzione

Per la realizzazione delle indagini georadar negli ambienti all'interno e all'esterno di Villa Diomede a Pompei è stato utilizzato il sistema IDS RiS Hi-mod Dual Frequency, di proprietà del Dipartimento dei Beni Culturali: archeologia, storia dell'arte, del cinema e della musica dell'Università degli Studi di Padova, con antenna 400-900 MHz montata su carrello dotato di odometro magnetico per il corretto rilievo delle distanze percorse (figg.3.19-3.20).



Figura 3.19-3.20 - Esecuzione di prova Georadar a Villa Diomede

Le acquisizioni, laddove gli spazi hanno consentito la pianificazione di una mappatura, sono state condotte secondo uno schema a maglia regolare con la realizzazione di profili monodirezionali, tra loro paralleli ed equispaziati 0.25 m, acquisiti in modalità monostatica, in modo da ottenere in fase di elaborazione la ricostruzione 3D del volume di sottosuolo investigato e poter sezionare lo stesso secondo mappe alle profondità reputate di interesse. In fig.3.21 vengono indicati gli spazi di prova, in giallo gli ambienti mappati, in rossi i profili singoli 2D.

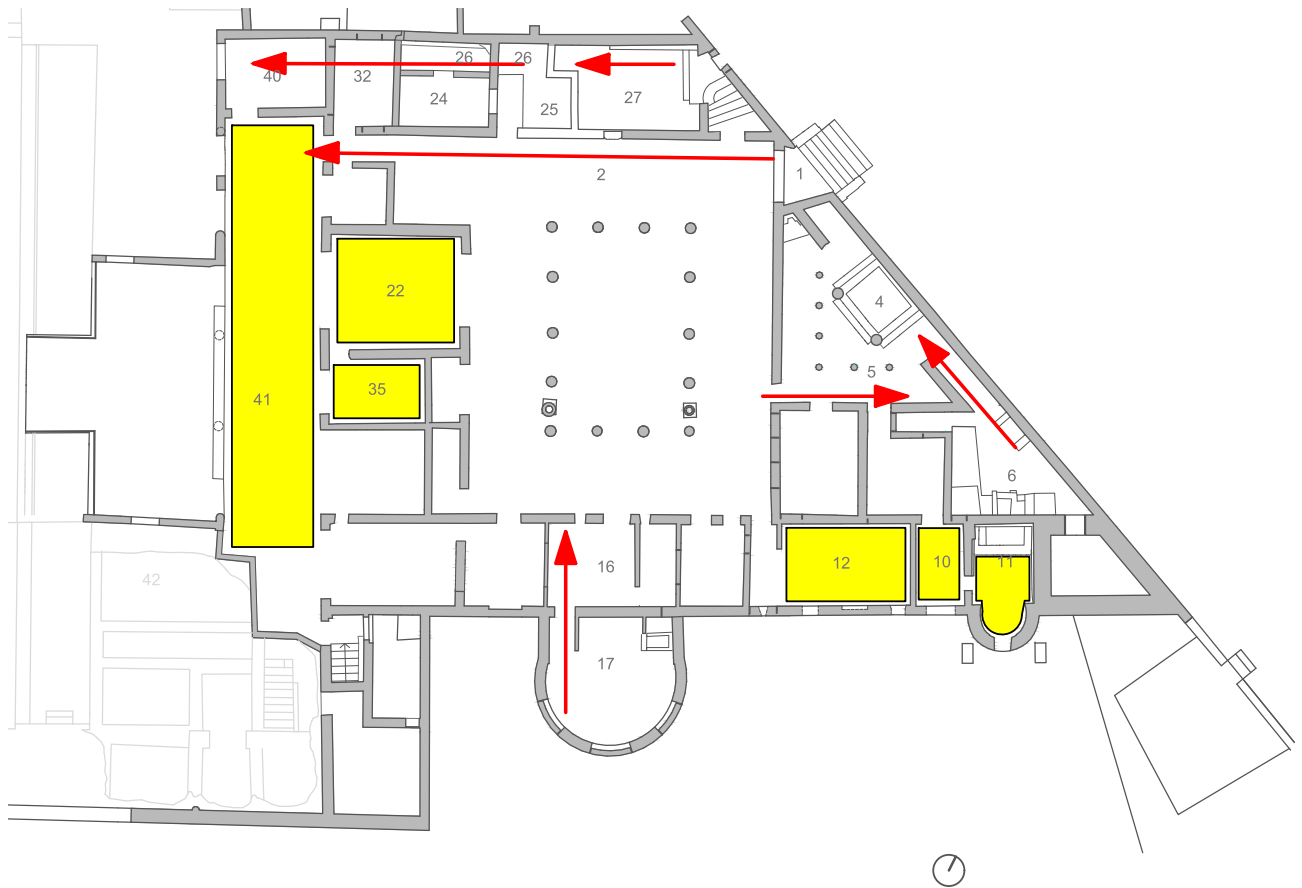


Figura 3.21 - Distribuzione delle aree di indagine Georadar negli ambienti di Villa Diomede a Pompei

Per facilitare le operazioni di restituzione del dato, considerate le irregolarità planimetriche e i numerosi ostacoli presenti all'interno dell'edificio (es. presenza di ponteggi metallici), la superficie di indagine è stata regolarizzata per ciascun ambiente considerando il massimo spazio libero accessibile.

Le singole sezioni georadar acquisite con lo schema descritto sono state elaborate con il software ReflexW e sottoposte a correzione dei tempi, dewow (laddove necessario), amplificazione del segnale (gain in Y scelto dall'operatore) e background removal, per ottenere un dato il più possibile filtrato, amplificato in termini di rapporto segnale/rumore e il più possibile corretto rispetto alle profondità stimate. Per la stima delle profondità di investigazione e il posizionamento spaziale delle anomalie riscontrate, si è operato considerando una velocità di transito media del segnale GPR pari a 0.1 m/ns, nell'ipotesi di presenza di suoli comuni. Va precisato che tale assunzione potrebbe generare un errore nella stima delle profondità sino ad un massimo di 10 cm rispetto alle quelle indicate in questa sede.

3.3.3 Risultati ed osservazioni

In generale la scelta dell'antenna georadar è vincolata dalla tipologia del target di interesse, in quanto le antenne a bassa frequenza consentono di investigare profondità maggiori (in ogni caso non più di 10 m in suoli comuni alla frequenza più bassa possibile) ma con risoluzione (dettaglio) minore, mentre le antenne con frequenza più alta, permettono di migliorare il dato in termini di risoluzione, penalizzando di fatto però la profondità di investigazione. I più recenti sviluppi tecnologici in questo campo hanno consentito ad oggi di superare questa limitazione e la necessità di dover fare una scelta a monte sulla frequenza dell'antenna da usare in campo. I sistemi georadar più moderni, come quello utilizzato per questo studio, consentono infatti, con una singola acquisizione, grazie all'utilizzo combinato e simultaneo di due diverse antenne, di ottenere due sezioni, che presentano caratteristiche differenti in termini di profondità e risoluzione, garantendo un risultato ottimale e più completo nel minor tempo possibile.

Il confronto tra le sezioni georadar acquisite con due differenti frequenze presso Villa Diomede, rispettivamente 400 MHz e 900 MHz, ha portato ad operare una scelta sulla restituzione finale del dato, prediligendo proprio una migliore risoluzione rispetto ad una maggiore profondità di investigazione, in quanto le anomalie più evidenti e di maggior interesse sembrano essere localizzate entro il primo metro di profondità.

Sulla base di queste evidenze e considerazioni si è pertanto deciso, in questa sede, di riportare solamente i risultati delle indagini condotte con l'antenna da 900 MHz che hanno consentito di investigare sino ad una profondità di circa 1.9 m rispetto all'attuale piano campagna e che garantiscono una risoluzione ottimale rispetto a quella offerta dallo stesso rilievo con l'antenna da 400 MHz.

I dati georadar alla frequenza 900 MHz opportunamente elaborati ed interpolati per ottenere una visualizzazione tridimensionale dello spazio investigato, hanno consentito così di valutare e scegliere le potenziali profondità di interesse alle quali poter estrarre le mappe più significative.

Di seguito viene riportata la mappa di isoampiezza del segnale georadar riflesso corrispondenti alla profondità di investigazione di 0.7 m (fig.3.22).



Figura 3.22 - Mappa delle isoampiezze del segnale georadar riflesso alla pseudo-profondità di 0.7 m rispetto all'attuale piano di calpestio

Da una prima analisi della mappa georadar riportata in fig.3.22 emergono in modo abbastanza chiaro evidenti anomalie riconducibili alla presenza di resti di strutture verosimilmente parte di ambienti che potrebbero, per orientamento, allineamento e pseudo profondità rilevata, appartenere alla stessa fase delle strutture più antiche che si trovano a NW di Villa Diomede.

Le anomalie sono più chiaramente distinguibili nella porzione di sottosuolo più superficiale, in quanto le strutture potrebbero essere state obliterate per cause naturali o per scelta volontaria a profondità maggiori, impedendone la corretta localizzazione.

In dettaglio si riscontrano resti di strutture (probabili murature) negli ambienti interamente mappati: 41, 22, 35 e 12. Si noti la chiara presenza di un ambiente vuoto (colore interamente viola) nella porzione del corridoio 41 di fronte alla stanza 19. Per quest'ultimo ambiente vuoto va precisato che questo fattore impedisce di fatto l'individuazione di eventuali strutture sottostanti.

Considerati poi i rilievi eseguiti a Villa Diomede con l'acquisizione di singole sezioni radar 2D si evidenzia la presenza di un piano inclinato (una scala o una rampa) nell'ambiente 20, degradante da sud verso nord (fig.3.23), verosimilmente riconducibile ad una struttura di connessione tra due diversi livelli della Villa (ambienti sepolti evidenziati in fig.3.22).

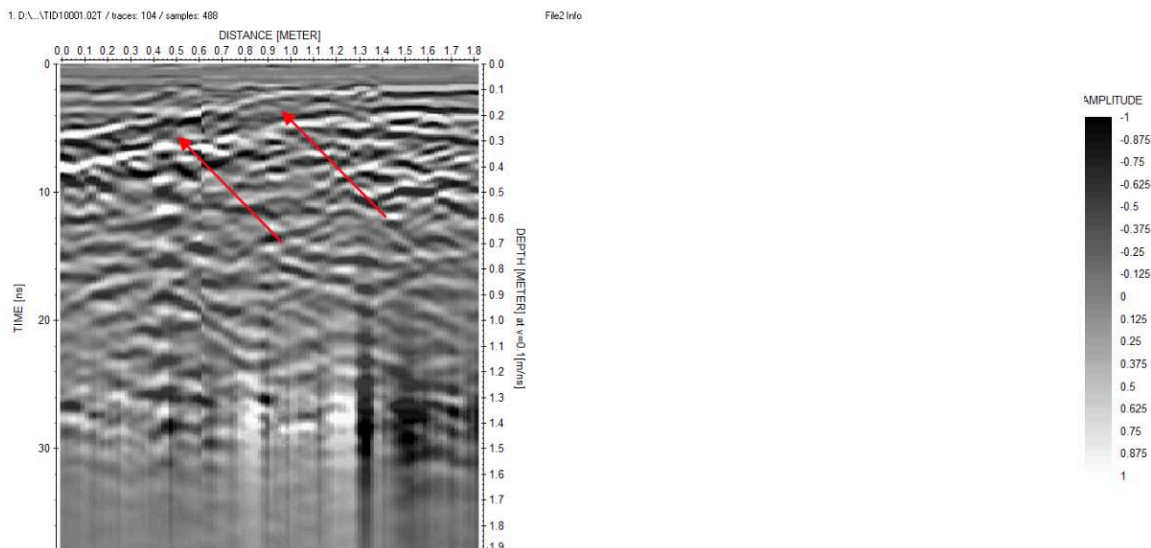


Figura 3.23 - Sezione georadar acquisita nell'ambiente 20 in direzione NS (evidenziato in rosso il riflettore inclinato)

In fig.3.24 è riportata la sezione longitudinale acquisita in direzione NE-SW a partire dall'ingresso alla villa secondo la direzione e il verso riportate in fig.3.21. Nella sezione sono evidenti diverse anomalie relative a probabili strutture di interesse (muri o canalizzazioni) intercettate durante il rilievo. Di particolare interesse l'anomalia evidenziata in rosso che potrebbe essere correlata a resti di una struttura muraria la cui direzione risulta in questa sede di difficile interpretazione.

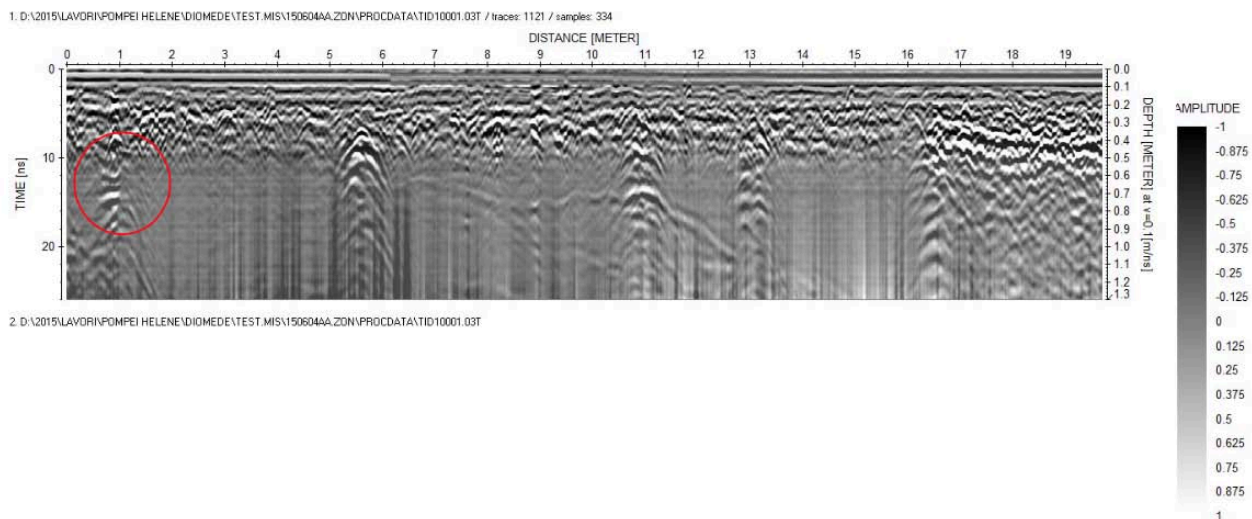


Figura 3.24 - Sezione georadar acquisita nell'ambiente 2 in direzione NE-SW in corrispondenza dell'accesso alla Villa Diomede

Capitolo 3

La sezione georadar nell'ambiente 6 evidenzia la presenza di diverse anomalie riconducibili alla presenza di probabili resti di strutture (iperboli) dislocate lungo la porzione di suolo indagata entro il primo metro di profondità. Le strutture probabilmente ortogonali alla direzione di acquisizione del profilo georadar risulterebbero inserite in un terreno di riporto.

Nella sezione georadar acquisita nell'ambiente 5 entro il primo metro risulta evidente un'anomalia riconducibile a resti di strutture di fondazione in corrispondenza della soglia della porta di accesso all'ambiente (passaggio dal giardino) evidenziata in figura con una freccia rossa. Nella stessa sezione è inoltre evidente una seconda anomalia, coerente per profondità con la prima, (freccia tra 2 e 3 m) probabilmente corrispondente ai resti di un'ulteriore struttura muraria, intercettata in direzione ortogonale alla sezione.

La presenza di uno strato verosimilmente di riporto nei primi 60 cm di suolo indagati nella sezione georadar degli ambienti 16-17, impedisce di rilevare la presenza di resti di strutture di interesse in corrispondenza degli stessi ambienti attraversati dal rilievo.

Nell'ambiente 27 la sezione consente di identificare la presenza di diversi strati di suolo di riporto entro il quale sono visibili numerose anomalie di difficile interpretazione in questa sede, ma chiaramente indicative di una significativa variazione laterale delle proprietà del suolo nella porzione indagata.

Dall'analisi della mappa georadar (fig.3.25) acquisita nell'ambiente 10 in direzione N-S con un'antenna da 2 GHz, (capace di rilevare con altissimo dettaglio le anomalie poco profonde), emerge che al di sotto della pavimentazione sono ancora presenti per l'intera estensione dell'ambiente, entro i primi cinquanta centimetri di profondità, le pile del sistema di riscaldamento del sistema termale. E' inoltre evidente lungo l'intera estensione della parete Est (fascia più scura) la probabile presenza di una canalizzazione a bordo della stessa.

In fig. 3.26 è invece riportata la mappa dell'indagine georadar condotta con l'antenna da 2 GHz nella stanza 11, attigua a quella precedentemente commentata. La mappa relativa alla pseudo profondità di 50 cm, rileva in modo meno evidente rispetto alla figura precedente la presenza del sistema di riscaldamento termale al di sotto della pavimentazione. Sebbene risultino possibili le tracce di eventuali resti di strutture di interesse al di sotto di questo primo strato, tuttavia le stesse sono difficilmente identificabili con chiarezza in questa sede e pertanto, se ritenuto di interesse si suggerisce l'interazione della presente indagine preliminare con ulteriori indagini non invasive per identificarne la reale esistenza.

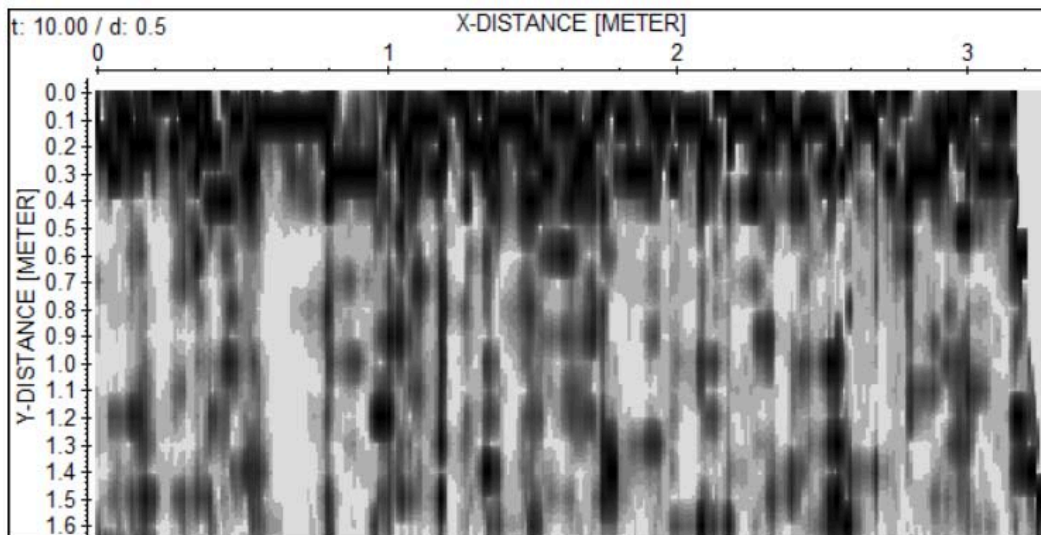


Figura 3.25 - Mappa georadar relativa alla pseudo profondità di 0.5 m acquisita in direzione N-S nell'ambiente 10

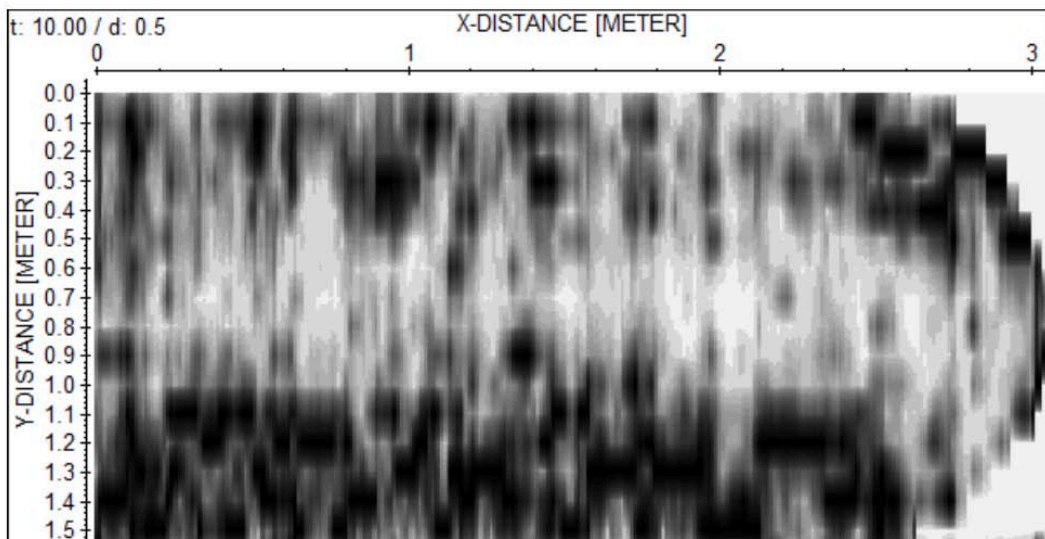


Figura 3.26 - Mappa georadar relativa alla pseudo profondità di 0.5 m acquisita in direzione N-S nell'ambiente 11

Concludendo, le misure georadar eseguite all'interno e all'esterno degli ambienti di Villa Diomede a Pompei hanno consentito di individuare, al di sotto dell'attuale piano di calpestio, tracce di probabili preesistenze legate a differenti fasi costruttive. Alla luce di queste interessanti anomalie, si auspica pertanto in primis la possibilità di verificare la natura delle stesse con saggi localizzati, ma anche di poter prevedere per il futuro una campagna estensiva di misure di tipo georadar, indispensabile per poter definire meglio la distribuzione e l'estensione di ulteriori anomalie, utili per una più completa lettura delle fasi costruttive che hanno interessato la vita della Villa Diomede.

3.4 Prove di identificazione dinamica

3.4.1 Procedura e strumentazione

L'identificazione dinamica e la conseguente analisi modale furono inizialmente sviluppate nel campo aeronautico e in quello aereo spaziale. A partire dagli anni '80 venne estesa al campo dell'ingegneria civile come metodologia d'indagine sulle caratteristiche dinamiche e il comportamento globale della struttura.

L'obiettivo principale di queste applicazioni è l'estrapolazione dei parametri modali: frequenze fondamentali, forme modali e rapporti di smorzamento.

L'impiego dell'identificazione dinamica agli edifici storici presenta alcune difficoltà dovute alla grande variabilità delle proprietà meccaniche delle murature che a differenza di altri materiali, come l'acciaio o il calcestruzzo, risultano meno omogenee. Nonostante tale limite resta una efficace soluzione per ottenere informazioni globali della struttura in modo assolutamente non distruttivo.

Altri obiettivi che si propone l'analisi dinamica è quella di diagnosticare le debolezze della struttura come i fenomeni di danno in atto permettendo di intervenire in modo preventivo su tali punti deboli. Attraverso il monitoraggio, inoltre, si possono evidenziare le prestazioni dell'edificio nelle condizioni di esercizio o durante particolari eventi ambientali per esempio un terremoto. Non solo, i diversi metodi di identificazione permettono di fornire indicazioni circa l'influenza degli interventi di consolidamento e di rinforzo che influenzano il comportamento dinamico dell'elemento considerato. Si fa uso di queste tecniche anche per la calibrazione dei modelli numerici (modelli ad elementi finiti – FEM) permettendo di aggiornare il modello in modo da renderlo aderente alla realtà.

Oggi la modellazione agli elementi finiti, sebbene la realizzazione di modelli complessi sia di grande supporto allo studio delle proprietà statiche e dinamiche delle strutture, si discosta dai valori reali ed effettivi dell'edificio per le seguenti cause⁵⁵:

- l'analisi agli elementi finiti è basata su una discretizzazione della realtà, con ciò si intende che i campi di spostamento vengono approssimati attraverso funzioni di forma predefinite all'interno di ciascun elemento;
- le proprietà di massa e di rigidità sono facilmente valutabili sulla base delle proprietà dei materiali e della geometria degli elementi, ma risulta molto più difficile tenere correttamente conto delle proprietà di smorzamento della struttura all'interno del modello, infatti, lo smorzamento non legato solamente alle proprietà dei materiali ma anche ad una serie di altri meccanismi difficili da modellare analiticamente (apertura e chiusura delle micro fessure, interazione con altri elementi non strutturali, ecc.);
- la geometria effettiva può essere diversa da quella considerata nel modello.

⁵⁵ G.Fabbrocino, C.Ranieri, G.M. Verderame, *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*, Università degli Studi di Napoli – Università degli Studi del Molise – Consorzio ReLUIS

Metodi di identificazione

In letteratura l'identificazione dinamica si esprime secondo una serie di classificazioni.

In primo luogo possiamo citare la grande suddivisione tra i metodi che operano nel dominio delle frequenze e quelli che operano nel dominio del tempo; l'utilizzo di uno o l'altro dominio dipende sostanzialmente dalla vastità della banda di frequenza indagata e dalla quantità di modi oscillatori. Normalmente, se il numero dei modi da identificare è modesto, o il range di frequenze è limitato, si prediligono le modalità basate sul dominio del tempo. Per contro, questi ultimi hanno il grande svantaggio di individuare solamente i modi che insistono all'interno del range di frequenza fissato a priori e non tengono in conto degli effetti dovuti ai modi esterni a tale range.

Un'altra classificazione è quella che considera la quantità dei modi che è possibile determinare: nel caso in cui siano molteplici si parla di MDOF (Multi Degree Of Freedom) mentre nel caso di trattazione di un singolo grado di libertà ci si riferisce all' SDOF (Single Degree Of Freedom).

Considerando il tipo di eccitazione impressa alla struttura si possono individuare due gruppi: input-output e output only con la differenza principale determinata dalla conoscenza o meno dei dati di input ovvero dell'eccitazione del sistema.

Nelle costruzioni storiche è più corretto servirsi delle seconde in cui l'input è caratterizzato dalla sola vibrazione dovuto ai fenomeni ambientali.

L'analisi modale sperimentale tradizionale (EMA) fa uso di misurazioni di input e di output per stimare i parametri modali, cioè, come prima esposto, frequenze modali, forme modali e rapporti di smorzamento. Tali parametri vengono calcolati attraverso la stima di una serie di funzioni, in termini di frequenza (Frequency Response Functions, FRF) o di impulso (Impulse Response Functions, IRS), che forniscono informazioni sulla risposta del sistema sottoposto all'input d'eccitazione.⁵⁶ L'impiego di questa tecnica si è ridotta in seguito allo sviluppo di algoritmi basati sulla FFT (Fast Fourier Transform) che permettono il passaggio dal dominio del tempo a quello delle frequenze. Tale trasformazione rende quasi diretta la stima modale che viene effettuata individuando direttamente i picchi delle funzioni FRF.

Operando nel dominio del tempo invece le modalità per l'elaborazione dei dati e l'interpretazione dei risultati sono un po' più complesse.

Grazie agli sviluppi nel campo dell'acquisizione dei dati e nell'elaborazione dei segnali digitali, vengono sfruttate molto le tecniche di tipo output only (OMA) che si basano sulla registrazione della sola risposta della struttura. La misura della risposta dinamica avviene in condizioni naturali (vento, traffico, attività antropiche) garantendo la vericità delle condizioni al contorno. Tuttavia esistono alcune problematiche legate a questo tipo di analisi come il fatto di rendere necessario l'impiego di attrezzature molto sensibili per poter apprezzare la risposta vista l'entità ridotta delle sollecitazioni e la necessità di prestare particolare

⁵⁶ Ewins DJ (1984), *Modal Testing: Theory and Practice*. John Wiley & Sons Inc, USA.

attenzione all'elaborazione dei dati, in quanto in possesso di soli dati di output. L'input, che comunque resta non noto dal punto di vista analitico, può essere considerato come un processo stocastico stazionario di rumore bianco.

Metodi di estrazione modale

Per l'estrazione modale esistono numerose metodologie, ognuno con la propria particolarità ed applicabilità che influenzano la scelta dell'uso di uno o dell'altro tipo.

Considerando l'ambito di analisi in ambiente OMA (Operational Modal Analysis), nel dominio delle frequenze si possono distinguere procedure di tipo parametriche e non parametriche. Le prime stimano i parametri modali da un modello parametrico, estrapolato a sua volta dai risultati del segnale processato attraverso un procedimento di fitting. I secondi derivano i parametri modali direttamente dai dati processati. Il Peak Peacking (PP) è un metodo non parametrico semplice ed immediato in quanto valuta le frequenze naturali dalla semplice osservazione dei picchi nel grafico della FRF, i modi vibrazionali dal rapporto tra i picchi in vari punti della struttura e gli smorzamenti dalla larghezza in ascissa dei picchi. La Frequency Domain Decomposition (FDD) è un metodo più avanzato che si basa sulla costruzione di una funzione PSD (Power Spectral Densities). Il vantaggio di questo metodo risiede nel fatto che si riescono a distinguere modi a frequenze vicine, che con il metodo PP sarebbero certamente confusi.

Il potenziamento di quest'ultimo metodo è di tipo parametrico conosciuto come EFDD (Enhanced Frequency Domain Decomposition) che sostanzialmente ricostruisce il segnale nel dominio del tempo attraverso una trasformata inversa (IDFT), successiva all'analisi FDD. Tramite questo metodo è possibile stimare anche i rapporti di smorzamento che non si era potuto osservare nella tecnica FDD.

Procedure di acquisizione

Per effettuare questo tipo di prova è necessario disporre di trasduttori, una scheda di acquisizione e un calcolatore. Il trasduttore è uno strumento che misura una quantità fisica, che generalmente definisce la risposta del sistema, per esempio uno spostamento, velocità o accelerazione, e attraverso un dispositivo ADC (Analog to Digital Converter), spesso indicato anche con A/D, viene trasformato in un segnale digitale dal sistema di acquisizione. Sono questi gli strumenti necessari per captare i dati vibrazionali della struttura. Per l'acquisizione del segnale le attrezzature maggiormente diffuse sono di tipo piezoelettrico, capacitivo, piezoresistivo o a forza bilanciata.

L'accelerometro piezoelettrico è un sistema massa-molla-ammortizzatore che sfrutta, come principio per la rivelazione dello spostamento della massa, il segnale elettrico generato da un cristallo sottoposto alla compressione indotta dal movimento della massa stessa. Il grande vantaggio di questi tipi di accelerometri è quello di non richiedere l'uso di alimentatori esterni e la capacità di rilevare enormi accelerazioni senza danneggiarsi (anche 1000 g). Allo stesso tempo presentano una sensibilità relativamente bassa e non possono rilevare accelerazioni costanti nel tempo (fig.3.27).

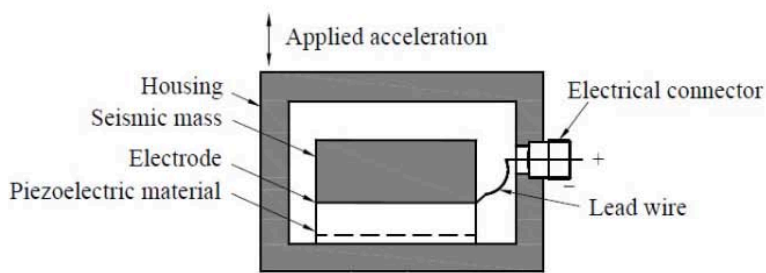


Figura 3.27- accelerometro piezoelettrico, sezione trasversale e modello in commercio. [Ramos, 2007, tesi di dottorato]

L'accelerometro capacitivo sfrutta, come principio per la rivelazione dello spostamento della massa, la variazione della capacità elettrica di un condensatore al variare della distanza tra le sue armature. Le due armature sono costituite dalla struttura fissa del dispositivo e dalla massa (realizzata con materiale conduttivo), la quale è sospesa su una membrana elastica relativamente rigida. Un apposito circuito rileva la capacità del condensatore e genera un segnale elettrico proporzionale alla posizione della massa. Sono dispositivi che richiedono la fornitura di energia elettrica e sono costosi ma sono in grado di misurare accelerazioni in modo uniforme e rispondere a eventi di accelerazione variabile fino anche fino a 1000 Hz (fig.3.28).

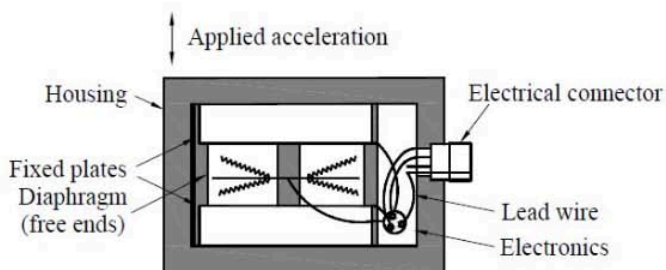


Figura 3.28 - accelerometro capacitivo, sezione trasversale e modello in commercio. [Ramos, 2007, tesi di dottorato]

L'accelerometro piezoresistivo è formato da una massa sospesa su un elemento a sbalzo, il quale ha dei misuratori di tensione incollati alla parte inferiore e superiore, lo spostamento della massa determina l'allungamento dei sensori, mentre la tensione di sbilanciamento, proporzionale all'accelerazione, viene letta da un voltmetro.

L'accelerometro a forza bilanciata si basa su un sistema massa-molla che sfrutta il segnale differenziale elettrico, proporzionale all'accelerazione, necessario a riportare la massa nella sua posizione d'equilibrio, per rilevarne lo spostamento. La massa (piastra centrale) è ancorata alla struttura attraverso quattro elementi che la tengono sospesa senza impedirne il movimento. A seguito dello spostamento, le due placche capacitive nella unit-cell riportano la massa nella posizione iniziale. Anche questi tipi di trasduttori

richiedono l'alimentazione esterna ma sono sensibili e molto robusti, suggeriti quindi per i test dedicati all'acquisizione delle vibrazioni ambientali (fig.3.29).

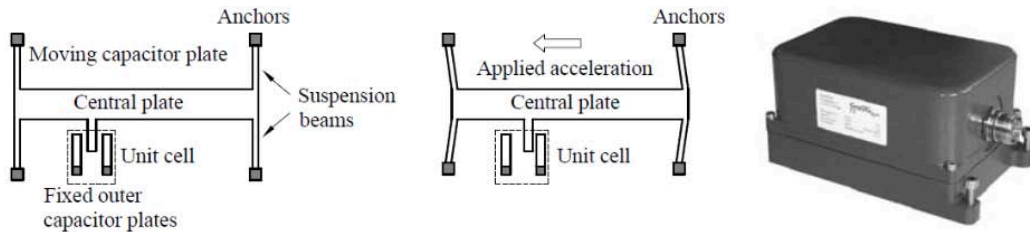


Figura 3.29 - accelerometro a forza bilanciata, sezione trasversale e modello in commercio. [Ramos, 2007, tesi di dottorato]

Signal processing

Una volta misurata la grandezza fisica dal trasduttore, è fondamentale convertire il segnale analogico ovvero quello reale continuo, in un segnale digitale, rappresentato da una sequenza di numeri ognuno dei quali rappresenta il valore del segnale in un determinato istante di tempo, si dice che il segnale viene discretizzato. Spetta al convertitore (ADC o A/D) eseguire questa operazione nel segnale che presenta molti ostacoli dovuti alle inevitabili errori per le approssimazioni nel passaggio dalla situazione reale al segnale digitale: aliasing, leakage e il quantisation error, fenomeni che possono essere ridotti mediante l'impiego di artifici matematici e il filtraggio del segnale. A questo punto risulta fondamentale introdurre il concetto di campionamento: il convertitore A/D discretizza il segnale elettrico così ottenuto, registrando il valore istantaneo del medesimo negli istanti temporali $1/f_s$, $2/f_s$, $3/f_s$, ..., N/f_s , che dipendono dalla frequenza di campionamento f_s .

Poiché non si ha alcuna informazione nell'intervallo tra due campionamenti, tale intervallo deve essere scelto accuratamente, una scelta sbagliata della frequenza di campionamento può produrre errori grossolani nell'elaborazione del segnale. Se, per esempio, la frequenza di campionamento è un sottomultiplo di quella da campionare ($f_s/2$, $f_s/3$, ecc) il segnale campionato sarà una sinusoide di una frequenza molto più bassa di quella del segnale reale. Questo tipo di errore è definito aliasing (fig.3.30).

Gli accorgimenti da adottare per prevenire l'aliasing sono i più svariati. A tale proposito si richiama il teorema di Nyquist-Shannon, che stabilisce che la minima frequenza di campionamento per evitare la costruzione di un segnale falsato è pari al doppio della frequenza massima che si intende campionare. Nel caso frequente di segnali random, che contengono un numero illimitato di frequenze, questo implica che la frequenza massima campionabile è pari a metà di quella di campionamento: $f_0 > 2f_{max}$.

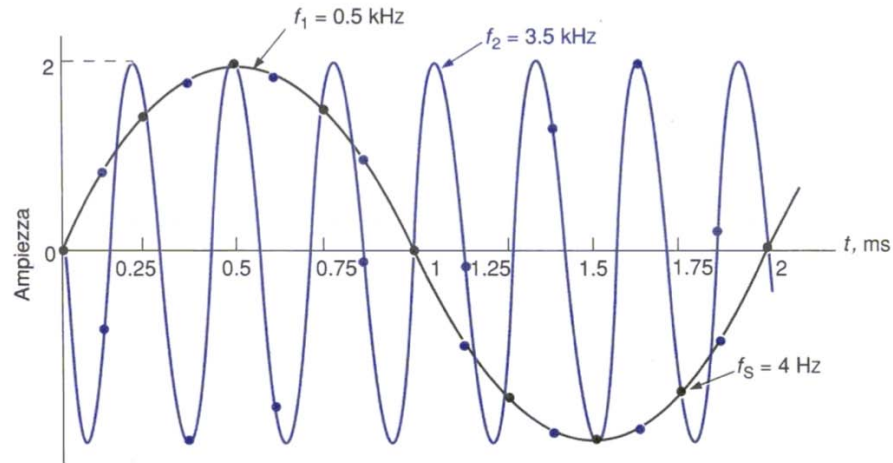


Figura 3.30 - esempio di aliasing. [Alberto Bonetto, Tesi di Laurea, 2013-2014]

Poiché il segnale analogico è convertito in un segnale discreto digitale, tale discretizzazione vale anche in ampiezza, non solo nell'asse temporale. Il convertitore A/D genera un numero fissato di livelli digitali discreti, o livelli di quantizzazione. Il valore del segnale all'istante di campionamento è arrotondato al livello digitale più vicino. Questo processo introduce l'errore di quantizzazione, ossia lo scarto tra il segnale analogico e quello digitale nel medesimo istante di campionamento. L'accuratezza del processo e l'entità dell'errore dipendono dal numero di livelli di quantizzazione disponibili nel convertitore, che a loro volta dipendono dal numero di bit (un convertitore a n bit, possiede 2^n livelli di quantizzazione, fig.3.31).

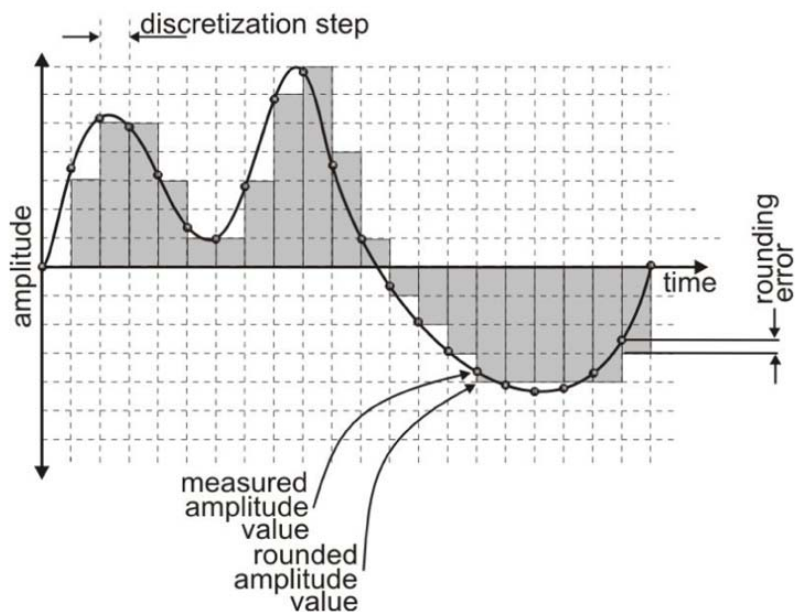


Figura 3.31 - errore di quantizzazione. [Alberto Bonetto, Tesi di Laurea, 2013-2014]

Il fenomeno di "migrazione" verso altre frequenze è detto leakage, ed è una delle problematiche più gravose nell'analisi del segnale legato alla lunghezza della time-history. Si tratta del trasferimento di un'aliquota dell'energia associata alle frequenze vere, verso le frequenze limitrofe. Dunque l'analisi di una registrazione in tempo finito può provocare questo tipo di errore (fig.3.32).

Per mitigare questa distorsione dello spettro di potenza il segnale in tempo è solitamente moltiplicato per una funzione, nota come funzione finestra. L'obiettivo di questa operazione è ottenere un decadimento graduale dell'ampiezza del segnale verso gli estremi dell'intervallo di campionamento, così da risultare più simile a un vero segnale periodico. Questo migliora la resa delle operazioni di trasformazione nel campo delle frequenze e trasferisce parte dell'energia migrata verso le frequenze proprie del sistema (fig.3.33).

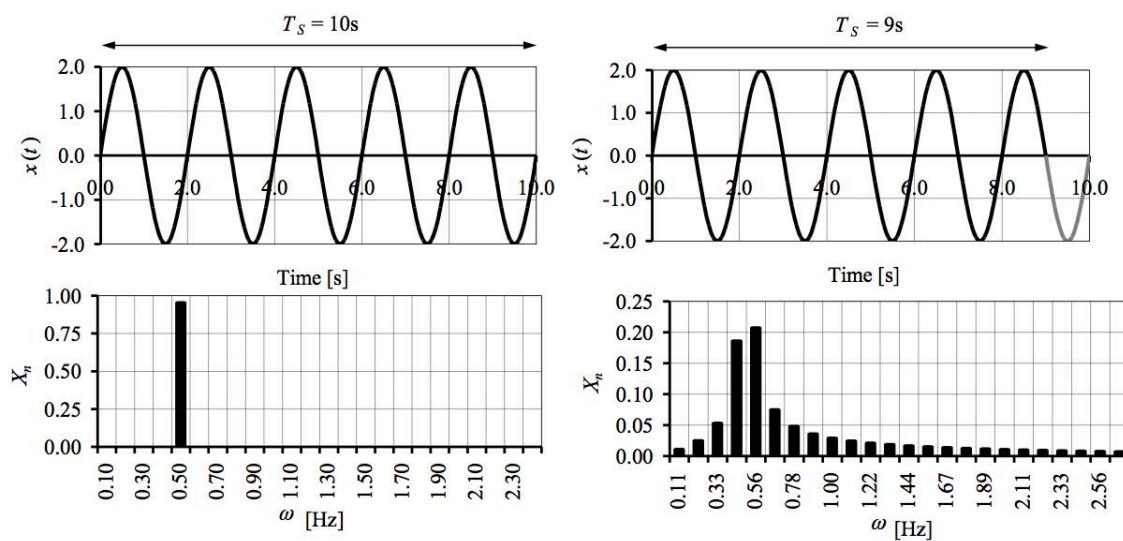


Figura 3.32 - Esempio di leakage error. [Ramos, 2007, tesi di dottorato]

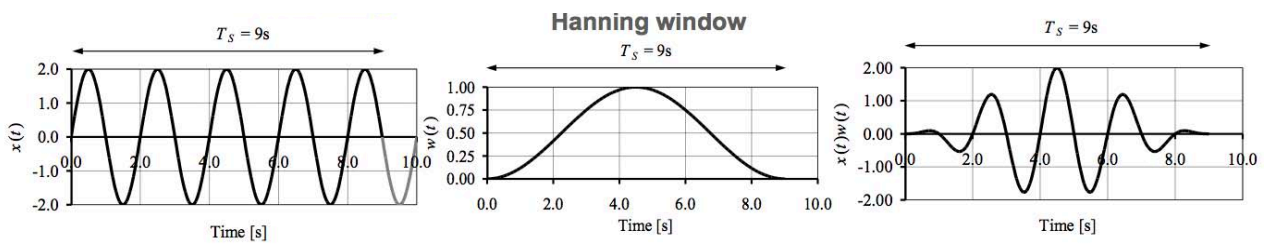


Figura 3.33 - Esempio di applicazione della finestatura. [Ramos, 2007, tesi di dottorato]

3.4.2 Pianificazione della campagna di prove

Esigenze

Le analisi dinamiche di Villa Diomede sono state precedute dalla creazione di un modello numerico (FEM) con riferimento alle informazioni materiche e storico-evolutive disponibili e discusse al capitolo 2.

Le informazioni riguardanti le caratteristiche dei materiali sono risultate scarse e il tipo di materiale da costruzione è stato definito dall'esame visivo non essendo in possesso di alcuna caratteristica meccanica che potesse essere utilizzata per una analisi strutturale.

Per descrivere il comportamento dei materiali quindi sono stati adottati i valori di riferimento dei parametri delle tipologie di muratura (per malta di caratteristiche scarse, assenza di listature, paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata) indicati nella tabella C8 A.2.1 della "Circolare 2 febbraio 2009, n. 617" (dato il basso livello di conoscenza, si sono adottati i valori minimi, Tab. 3.4).

Tabella 3.4 – Caratteristiche meccaniche indicate nella Circolare 2 febbraio 2009, n. 617

Materiale	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	W [N/m ³]
Muratura in pietra disordinata	690	230	19000
Muratura a conci sbazzata (con paramento limitato e spessore e nucleo interno)	1020	340	20000
Muratura a conci di pietra tenera	900	300	16000
UNI(RC)_Rck25	28500	11875	25000

Modello FEM preliminare

La modellazione della struttura è stata eseguita in AutoCAD tramite superfici 2D, esportata tramite il formato IGES ed importata nel pre-processor Midas FX+, in cui sono stati utilizzati elementi "Curved Shell" bidimensionali per simulare le pareti in cui è stata eseguita la fase di mesh di tipo Delauney (Quad+Tri) del modello, con elementi di tipo CQ40S, CT30S, Q20SH, T15SH.

Il modello risulta vincolato a terra con la tipologia dell'incastro perfetto che impedisce traslazioni e rotazioni in qualsiasi direzione.

La bontà della modellazione è stata verificata mediante un'analisi statica lineare della struttura sotto effetto del peso proprio. I risultati dell'analisi hanno indicato spostamenti massimi dell'ordine dei decimi di mm in corrispondenza delle coperture a volta a botte, risultato compatibile con i materiali e la tipologia strutturale; anche le reazioni vincolari ricavate dal solutore risultano compatibili (fig.3.34).

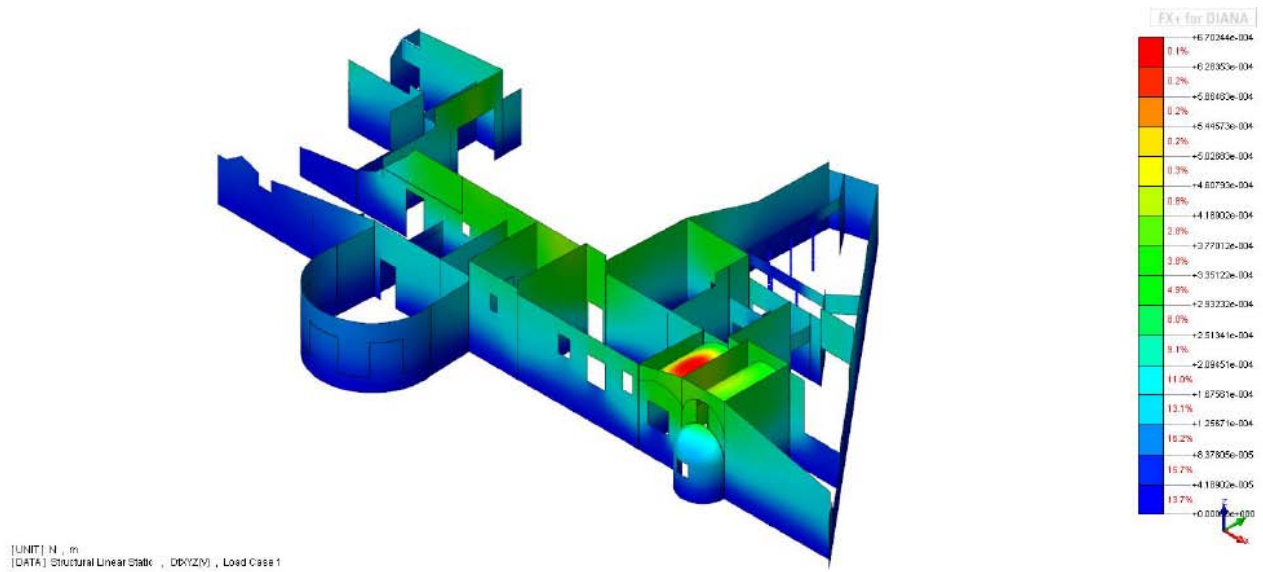


Fig. 3.34: Diagramma dei risultati dell'analisi statica lineare

L'analisi modale della struttura ha riguardato i primi 100 modi di vibrare ottenuti hanno evidenziato che i modi di vibrare non interessano mai grosse porzioni di massa e i valori più alti si verificano alle frequenze di 15 - 16 Hz. Nella tabella seguente vengono riportati i principali modi emersi dall'analisi (Tab.3.5).

Tabella 3.5 – frequenze che riportano maggiore partecipazione modale con riferimento al modo del modello analizzato

Modo di vibrare	Frequenza [Hz]	Partecipazione modale [%]
29	11,55	1,94E+00
50	15,18	3,00E+00
51	15,37	2,32E+00
56	16,69	3,45E+00
78	20,05	1,78E+00
79	20,11	1,44E+00

3.4.3 Localizzazione

Le prove di identificazione dinamica effettuate al piano terra e al livello del giardino di Villa Diomede sono state schematizzate in Tab.3.6 attraverso l'assegnazione di un numero e un nome identificativo.

Tabella 3.6 - Localizzazione e numero identificativo delle prove dinamiche

ID	Localizzazione	
ID_01	Pilastro n°58	Livello del giardino
ID_02	Pilastro n°48	Livello del giardino
ID_03	Pilastro n°15	Livello del giardino
ID_04	Interno Villa	Piano terra
ID_05	Muro d'ambito est	Piano terra
ID_06	Quadriportico, lati sud-ovest	Livello del giardino

Le ID_01 e ID_02 riguardano rispettivamente il pilastro numero n°58 e n°48, entrambi appartenenti al lato est del quadriportico al livello del giardino (fig.3.35).

Il pilastro n°58 (ID_01), di sezione 0,40m x 0,61m, presenta listature in laterizio poste a 1/4 e 2/4 dei suoi 3,40m di altezza; particolarmente evidente è la situazione di degrado alla base del pilastro dovuta all'esposizione ambientale che, attivando fenomeni di tipo chimico e biologico, ha provocato una notevole riduzione di sezione. La distribuzione degli 8 accelerometri coinvolge il lato corto a est e il lato lungo a sud come in fig.3.36.

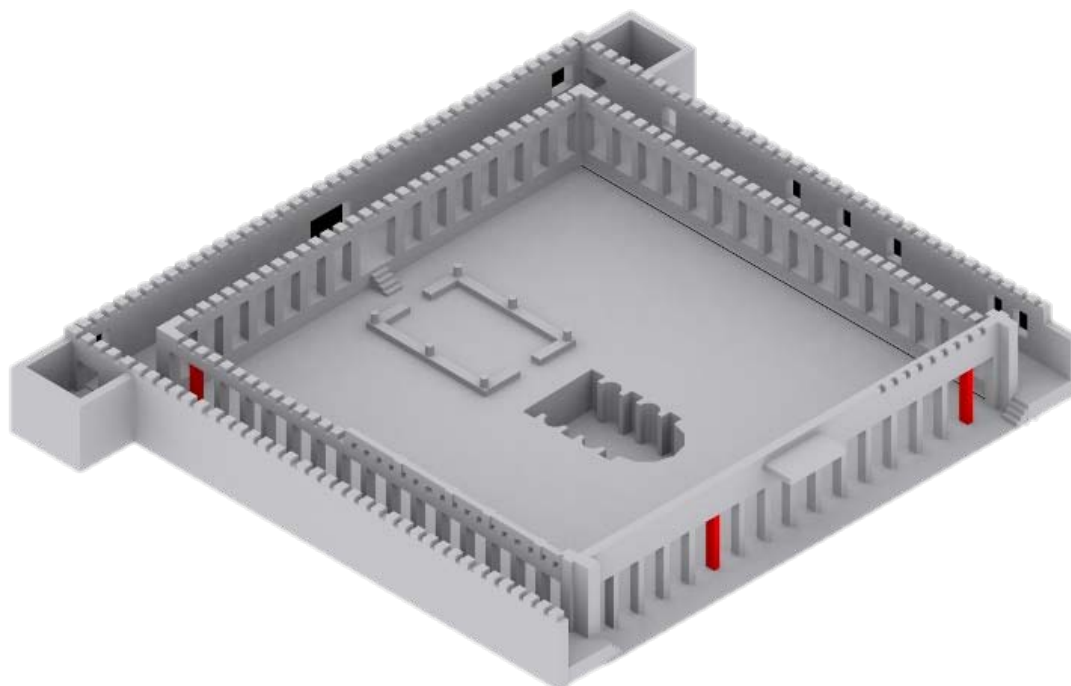


Figura 3.35 - localizzazione della prova ID_01 e ID_02

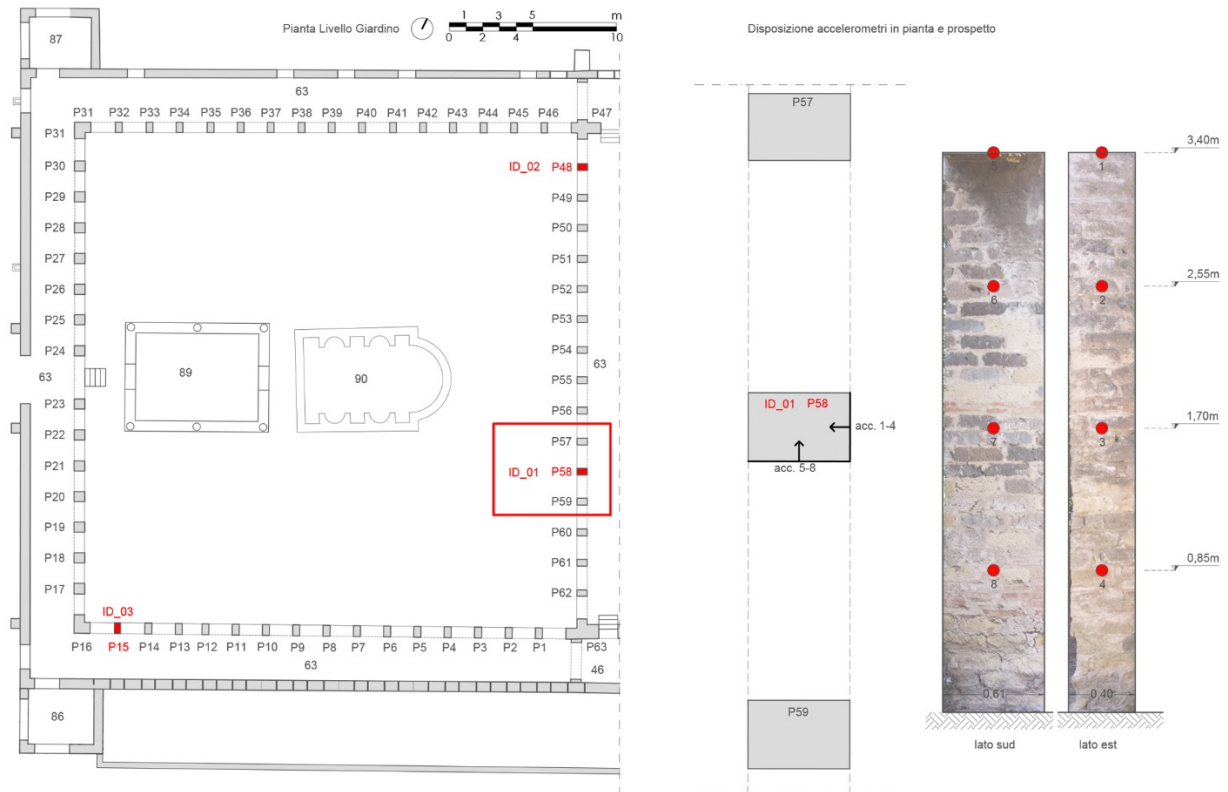


Figura 3.36 – particolari geometrici della prova ID_01

Anche il pilastro 48 (ID_02), con le stesse dimensioni geometriche (0,41x0,60x3,40m) presenta, a $\frac{1}{2}$ e $\frac{2}{3}$ della sua altezza, degli elementi regolari in cotto differenti dagli altri elementi strutturali costituenti lo stesso pilastro. In questa prova gli accelerometri sono posizionati 5 a sud e 3 a ovest con il 4° in corrispondenza della listatura. La parte sommitale è caratterizzata da una notevole fessurazione comprendenti più elementi strutturali (fig.3.37).

La ID_03 corrisponde alla prova di identificazione dinamica effettuata nel pilastro n°15, appartenente al lato sud del quadriportico. Rispetto ai pilastri numeri 58 e 48 prima descritti, l'altezza si riduce a 2,55m con una sezione di 0,36m x 0,65m mentre la distribuzione degli accelerometri riguarda il lato sud e il lato ovest. Il degrado e i danni più evidenti di questo elemento si localizzano soprattutto in mezzeria con una evidente polverizzazione della malta di allettamento e erosione degli elementi (fig.3.38).

Quest'ultimo pilastro rientra nel setup di identificazione dinamica ID_06 effettuata utilizzando 16 accelerometri disposti in sommità degli architravi dei lati sud (P16, P14, P12, P10, P8, P6, P4) e ovest (P16, P18, P20, P23, P25, P27, P29, P31) dello stesso portico a livello del giardino disposti ad una altezza media di 3.00m (fig.3.39).

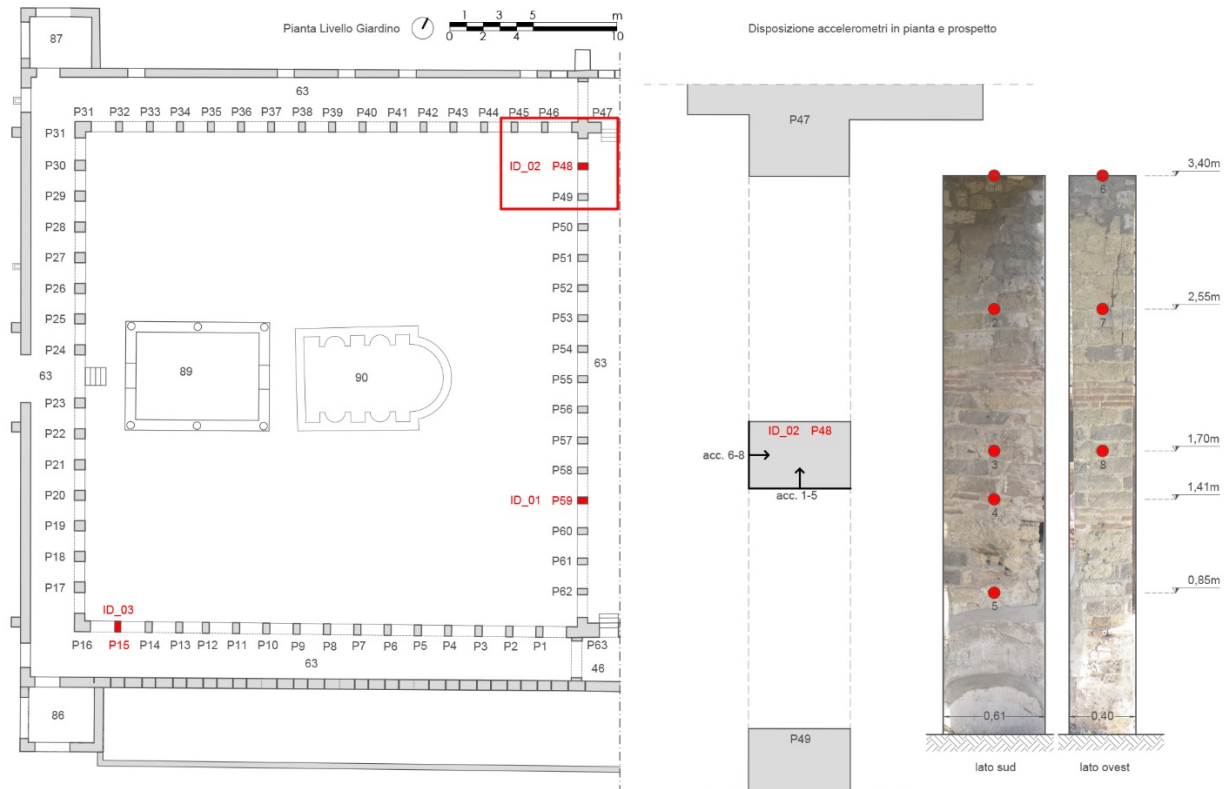


Figura 3.37 - particolari geometrici della prova ID_02

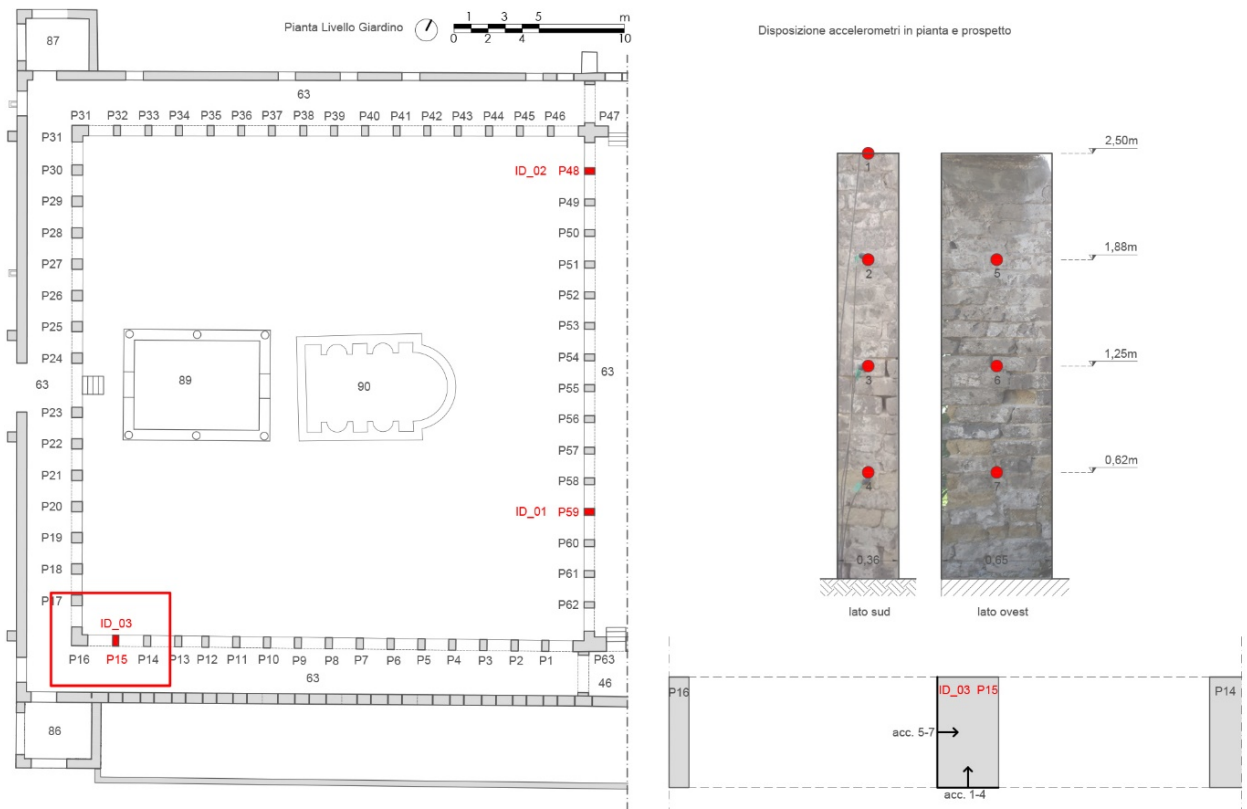


Figura 3.38 - particolari geometrici della prova ID_03

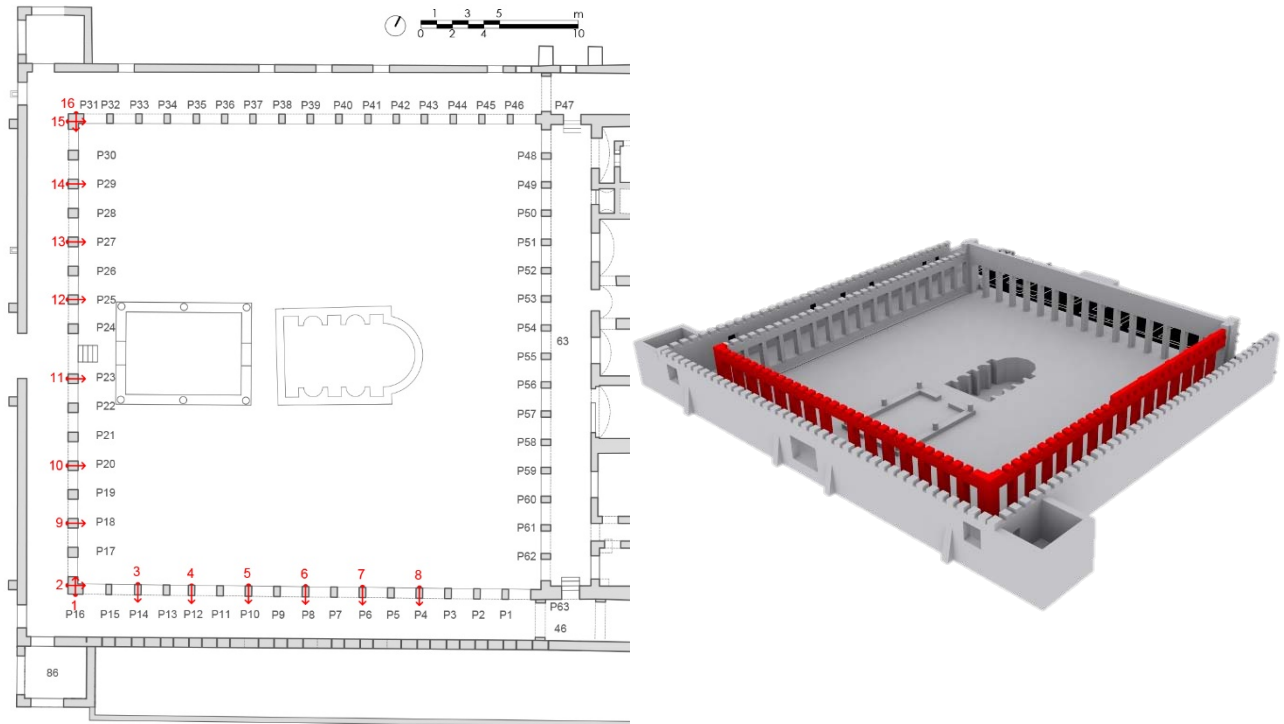


Figura 3.39 – Localizzazione della ID_06, lati sud e ovest del quadripartico

Con i risultati del preliminare modello numerico precedentemente accennato è stata scelta la localizzazione della ID_04: 16 accelerometri sono stati disposti nelle due murature parallele con asse est-ovest che delimitano gli spazi 12, 13, 14, 15, 16 del piano terra ad una altezza media da terra di 3,00m secondo lo schema di fig.3.40. L'obiettivo della prova è caratterizzare il comportamento globale della porzione indagata e verificare la continuità degli elementi strutturali e possibilmente il grado di ammorsamento con i setti trasversali presenti.

Il muro d'ambito est corrisponde alla localizzazione della prova ID_05 effettuata con l'acquisizione del segnale di otto accelerometri, 6 posti alla stessa altezza nel muro principale verso via delle Tombe e 2 nel muro sud dell'ambiente 7 (fig.3.41).

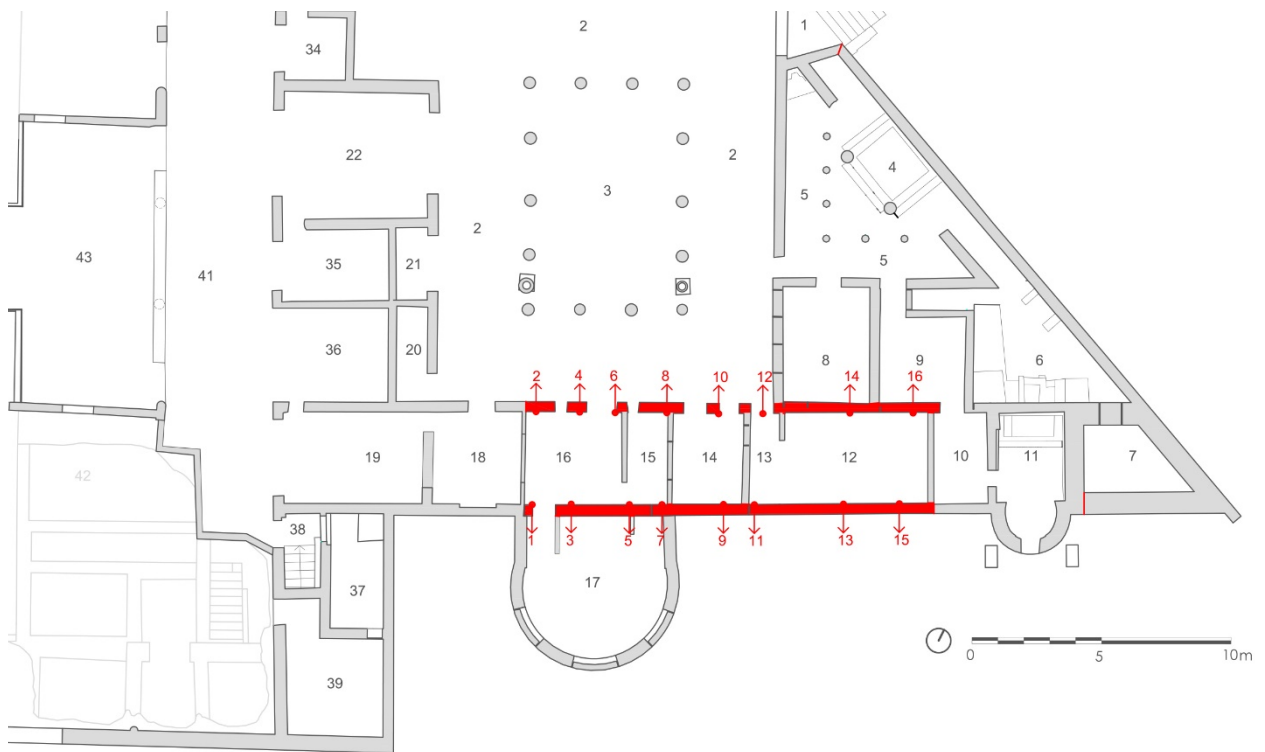


Figura 3.40 – Localizzazione e disposizione accelerometri della prova ID_04

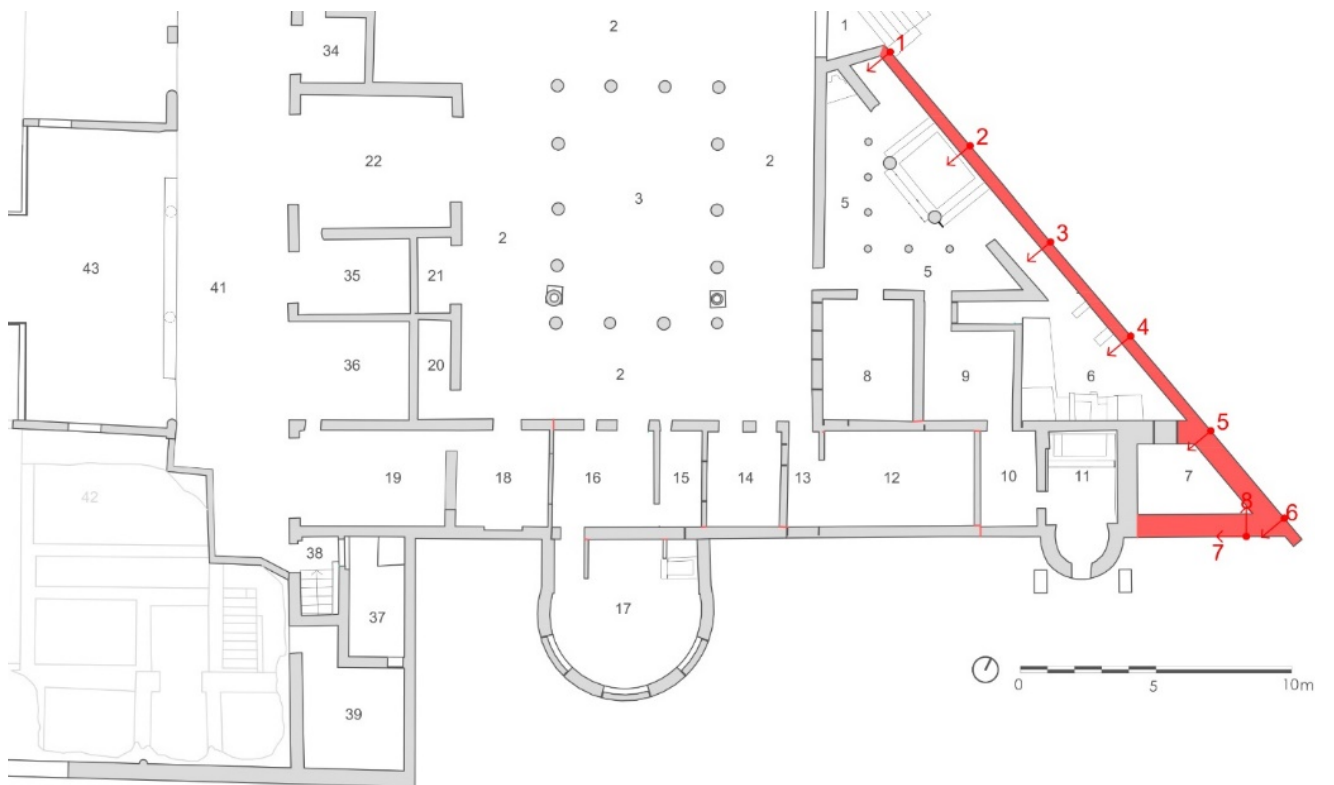


Figura 3.41 – Localizzazione e disposizione accelerometri della prova ID_05

3.4.4 Esecuzione della prova: acquisizione ed elaborazione dei dati

La fase che segue la localizzazione delle prove è l'acquisizione vera e propria del segnale nei punti selezionati della struttura.

La strumentazione di acquisizione impiegato a Villa Diomede è lo stesso per ogni prova identificata e si basa su una piattaforma composta da un computer portatile, da un'unità digitale di acquisizione dati, e da una serie di accelerometri di tipo piezoelettrico.

Data la rilevanza storico-artistica del manufatto non è stato possibile perforare le murature quindi per la disposizione degli accelerometri si è preferito l'uso di colla a caldo con la relativa rimozione al termine del test (fig.3.42).

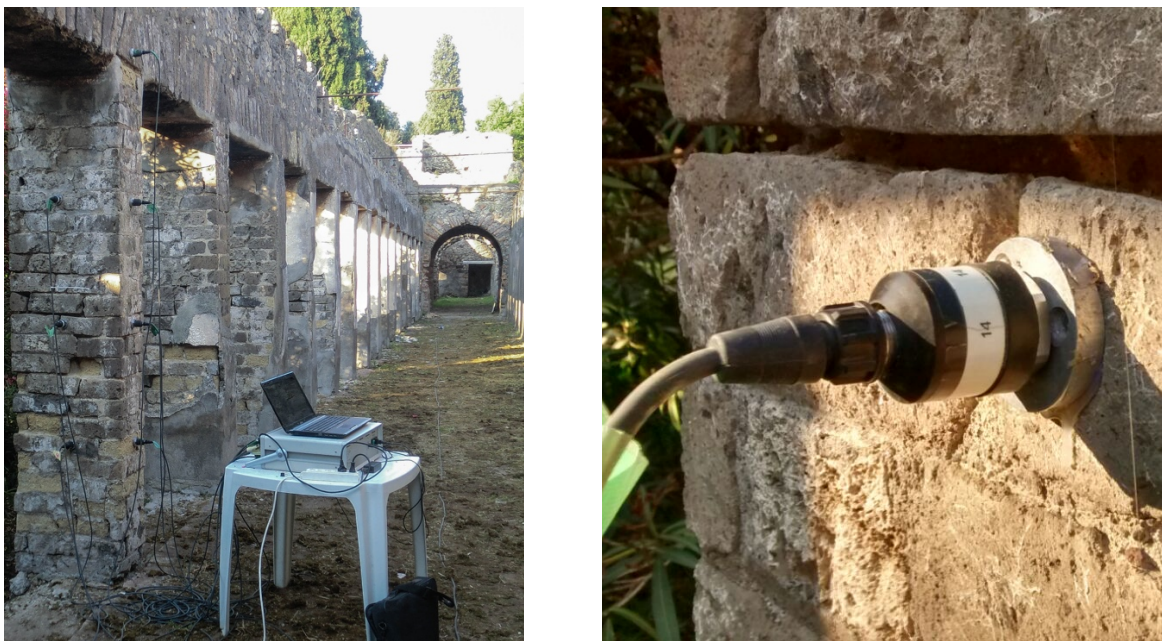


Figura 3.42 – A sinistra la strumentazione utilizzata, a destra un accelerometro in funzione

La gestione delle acquisizioni e la loro registrazione viene eseguita da un apposito software che esegue automaticamente la conversione del segnale elettrico in formato digitale memorizzandoli nel disco rigido del computer. Attraverso le schermate messe a disposizione dal software è possibile visualizzare il segnale registrato, configurare i diversi canali secondo i specifici parametri, processare il segnale (FFT) e memorizzare o caricare i dati acquisiti (vedi quanto esposto al par.3.2.1).

Al fine di ottimizzare la restituzione dei risultati e permettere una corretta interpretazione dei segnali si sono annodate la frequenza di campionamento F_c e il periodo di campionamento T_c adottate. Inoltre si è scelto di effettuare più acquisizioni per ogni identificazione; tali informazioni vengono schematizzate in tabella 3.7 in cui N indica il numero di acquisizioni effettuate.

Tabella 3.7 – Parametri di acquisizione delle prove dinamiche effettuate

ID	Tc [s]	Fc [Hz]	N°
ID_01 – Pilastro 58	0.01	100	2
ID_02 – Pilastro 48	0.01	100	3
ID_03 – Pilastro 15	0.01	100	2
ID_04 – Interno Villa	0.005	200	2
ID_05 – Muro d'ambito est	0.01	100	3
ID_06 – Quadriportico	0.01	100	2

Per quanto riguarda l'identificazione dei parametri modali è stata utilizzata la tecnica denominata output-only che sfrutta le vibrazioni esterne di tipo ambientale alle quali la struttura è costantemente sottoposta mentre i parametri modali sono stati estratti tramite il software ARTeMIS Extractor 4.0 attraverso l'algoritmo della Frequency Domain Decomposition (FDD) e Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD) che come riportato al capitolo 3.2.1 derivano dallo sviluppo dell'algoritmo del Peak Peacking (PP). Grazie alla tecnica EFDD si è potuto ricavare anche il coefficiente di smorzamento per ogni modo di vibrare. Di seguito vengono illustrate passo per passo le fasi di elaborazione svolte per ottenere i risultati. Il software durante l'acquisizione registra le accelerazioni simultaneamente di ogni accelerometro creando un file [.txt], essenziale per comunicare al software di elaborazione la time-history acquisita (fig.3.43).

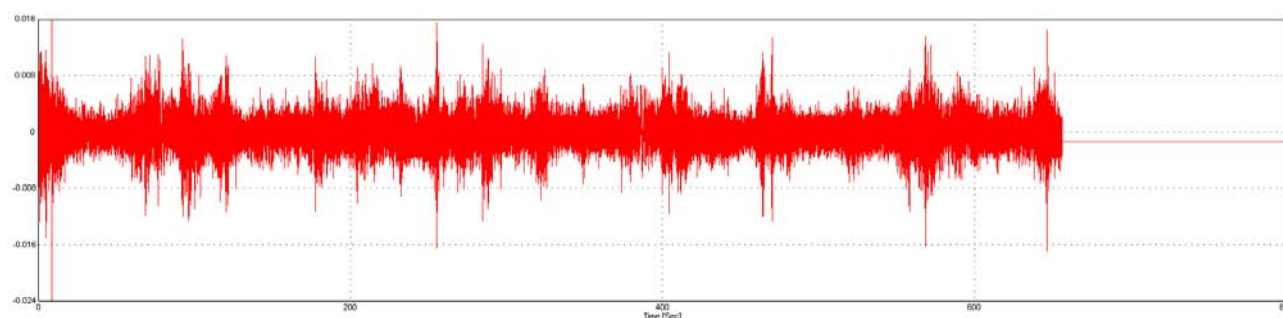


Figura 3.43 – Time history delle accelerazioni registrate durante una acquisizione

ARTeMIS Extractor 4.0 sopra citato richiede la creazione di un file [.cfg] che non è altro che un documento di testo contenente i dati principali che definiscono la struttura oggetto di studio. La procedura di configurazione avviene tramite l'inserimento di parole chiave riconoscibili dal programma ed è suddivisa in tre parti.

La prima parte è dedicata all'intestazione contenente i dati identificativi del lavoro in oggetto, eventuali note, i nominativi dei tecnici che hanno eseguito l'installazione e i due dati necessari per l'elaborazione dei segnali acquisiti: la frequenza di campionamento adottata (SF) e il periodo di campionamento ($T = 1/SF$) precedentemente riassunti in tabella 3.7.

La seconda parte del file richiede l'inserimento delle caratteristiche geometriche della struttura in esame. Per questa operazione è stata utile la creazione in AutoCAD dello schema di prova individuando i nodi con le relative coordinate spaziali x, y, z per riportarle nel file [.cfg]. ARTeMIS riuscirà in questo modo a ricostruire il modello seguendo le indicazioni riportate nelle colonne del file: nome identificativo del nodo, linee colleganti i nodi e indicazione delle superfici divise per triangoli.

Con questa operazione è stata configurato il modello e la geometria della porzione in esame è completamente definita.

La terza e ultima sezione del file [.cfg] è relativa al posizionamento degli accelerometri e l'attribuzione della Time History registrata durante l'acquisizione attraverso la creazione di un documento di tipo [.mes]. Ogni accelerometro viene associato al nodo corrispondente specificando la direzione dello stesso e il tipo di dato acquisito (accelerazione, spostamento, ecc.) come indicato in figura 3.44.

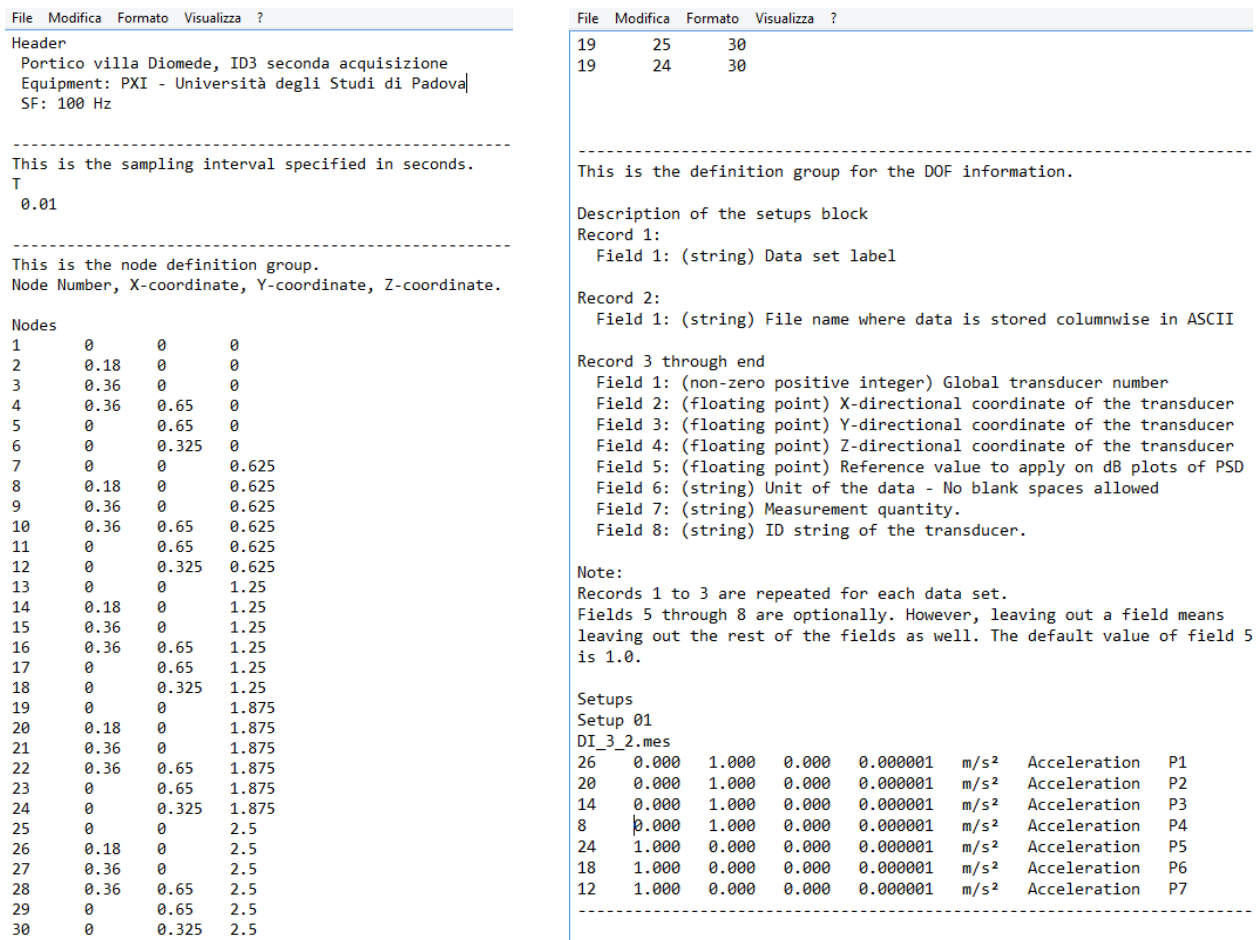


Figura 3.44 - A sinistra il file di configurazione con inserimento dell'intestazione e dati geometri. a destra l'inserimento del setup degli accelerometri

Una volta terminata la compilazione ARTeMIS potrà leggerlo e, previa verifica della correttezza del modello geometrico, la disposizione degli accelerometri, affrontare il processamento del segnale con l'applicazione di filtri destinati a ridurre i problemi di aliasing e leakage già illustrati ai capitoli precedenti.

Inseriti i dati e processato il segnale è possibile visualizzare il grafico sul quale vengono individuati i picchi corrispondenti alle relative forme modali e le rispettive frequenze e rapporti di smorzamento (quest'ultimo solo con la tecnica EFDD, fig.3.45).

L'individuazione dei modi fondamentali sono stati individuati sia con la tecnica FDD sia con la tecnica EFDD, in modo da verificare e confrontare la corrispondenza tra le forme modali.

Il confronto, esteso anche alle altre acquisizioni di una medesima prova si è svolto tramite il Modal Assurance Criterion (MAC). L'indice di MAC è un numero compreso tra 0 ed 1, dove 1 o un valore molto vicino ad 1 indica che le due deformate modali a confronto sono proporzionali, quindi uguali a meno di una costante, mentre un valore vicino allo zero indica che tra i due modi a confronto non c'è corrispondenza. Un buon valore di MAC è un indice maggiore di 0,9 (fig.3.46).

Nel seguente capitolo si riportano i risultati e gli approfondimenti relativi ad ogni prova.

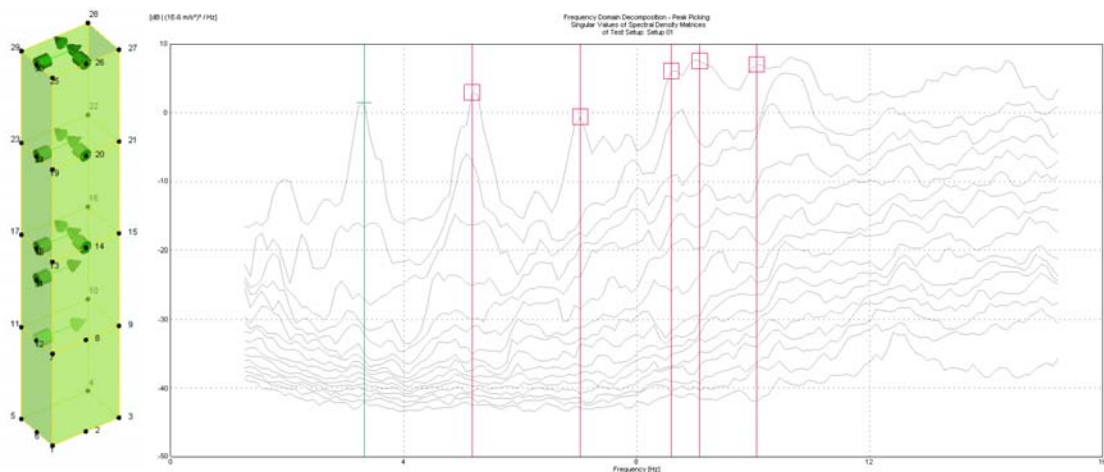


Figura 3.45 – Modello Tradotto in Artemis e analisi EFDD



Figura 3.46 – Esempio di comparazione tramite indici di MAC

3.4.5 Risultati e osservazioni

Vengono ora riportati i risultati e le osservazioni ottenute dalle varie elaborazioni a partire dai tre pilastri del quadriportico (ID_01, ID_02, ID_03, fig.3.47). Seguirà la ID_06 del quadriportico in modo da poter confrontare le frequenze del pilastro 15 (ID_03) con quelle ricavate dall'elaborazione globale dello stesso portico. I risultati della ID_04 e ID_05, riguardanti le murature parallele dell'interno della Villa e il muro d'ambito est concluderanno il presente capitolo.

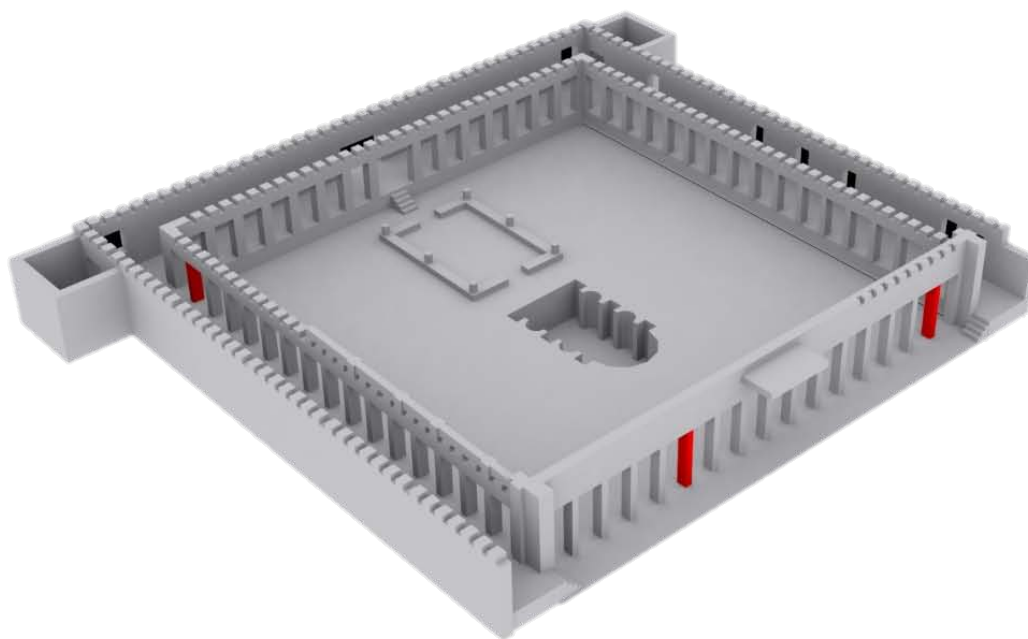


Figura 3.47 - Rappresentazione tridimensionale del quadriportico, localizzazione della ID_01, ID_02, ID_03

ID_01 – Pilastro n°58

Per il pilastro n°58 che identifica la ID_01 sono state innanzitutto confrontate i modi fondamentali ottenuti con la tecnica FDD e EFDD. Alla frequenza di 3,594 Hz si osserva una risposta di tipo flessionale fuori piano alla base del pilastro probabilmente influenzato dallo stato di degrado avanzato (tab.3.9, modo 1), ai modi 2 e 3 si hanno rispettivamente le prime risposte flessionali nel piano e fuori piano. La quarta frequenza fondamentale descrive ancora un comportamento di tipo flessionale con direzione est-ovest, ovvero lungo lato lungo del pilastro. Il modo di vibrare n°5 alla frequenza di 12,18 Hz identifica il comportamento torsionale.




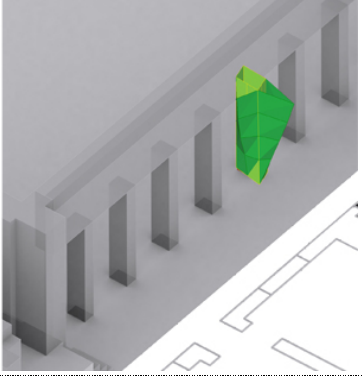



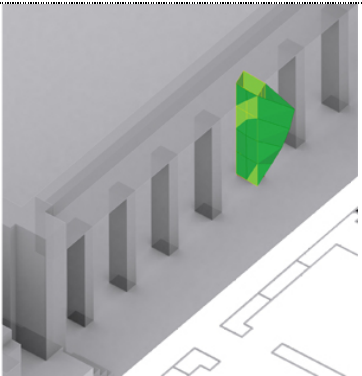



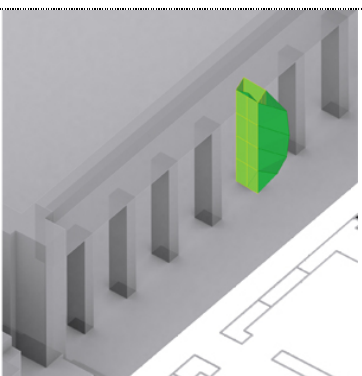
Nelle tabelle seguenti vengono schematizzati i modi di vibrare con le rispettive frequenze individuate tramite le tecniche FDD e EFDD, l'errore in percentuale fra le stesse e l'indice di MAC ottenuto dal confronto delle diverse acquisizioni (Tab.3.8).

Tabella 3.8 - Confronto acquisizioni ID_01

ID_01 – Pilastro n°58 – Quadriportico, livello del giardino										
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione e confronto 1° e 2° acquisizione										
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				Confronto 1°-2°	
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	Errore %	MAC
1	3.622	3.602	3.200	1.66	3.564	3.594	3.193	-0.83	0.22	0.9701
2	6.201	6.196	1.357	0.08	6.201	6.209	1.044	-0.13	-0.20	0.9917
3	7.520	7.510	2.179	0.13	7.324	7.409	2.151	-1.14	1.36	0.9943
4	8.154	8.133	1.384	0.25	8.105	8.126	1.356	-0.25	0.08	0.9962
5	12.060	12.210	3.517	-1.22	11.96	12.180	3.128	-1.80	0.24	0.9998

Tabella 3.9 – Forme modali ID_01

ID_01 – Pilastro n°58 – Quadriportico, livello del giardino			
Forme modali (2° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	3.594	-0.83	<p>Flessionale alla base</p>
2	6.209	-0.13	<p>Flessionale fuori piano</p>

3	7.409	-1.14	<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 	 <p>Flessionale</p>
4	8.126	-0.25	<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 	 <p>Flessionale fuori piano</p>
5	12.180	-1.80	<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 	 <p>Torsionale</p>

ID_02 – Pilastro n°48

Anche per il pilastro n°48 si sono preliminarmente studiate le forme modali ottenute con i due diversi algoritmi (FDD e EFDD) ottenendo indici di MAC accettabili sia per la seconda sia per la terza acquisizione.

La prima acquisizione non è stata considerata poiché i segnali non corrispondevano alle altre due.

La prima forma modale alla frequenza di 4,424 Hz indica un comportamento pressoché identico a quello osservato alla frequenza di 7,100 Hz (modo 3): entrambi descrivono una risposta di tipo flessionale fuori piano.

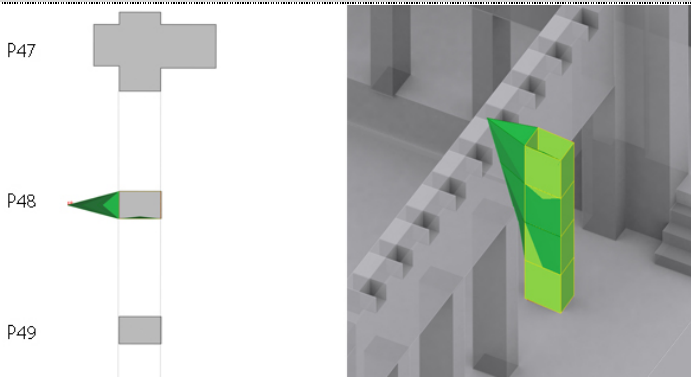
Il modo torsionale si verifica alla frequenza di 6,237 Hz con una forma modale richiamata anche alla frequenza di 10,84 Hz del quarto modo di vibrare presentandosi più accentuata in direzione est-ovest.

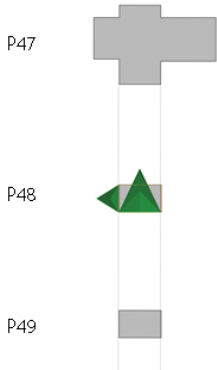
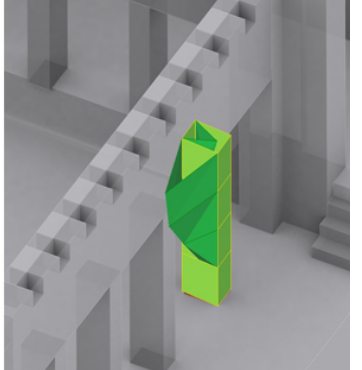
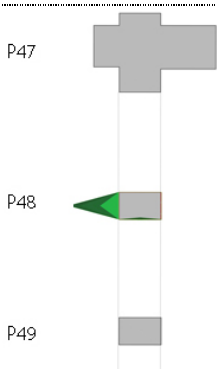
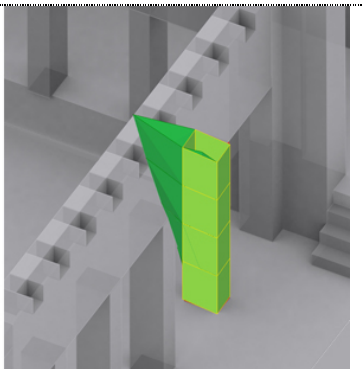
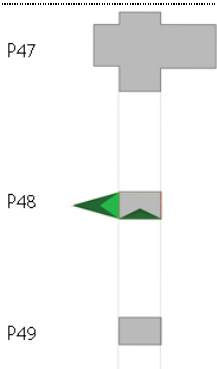
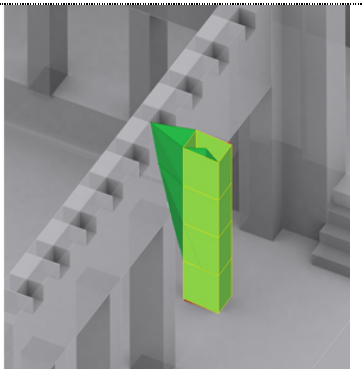
Come per la ID_01, vengono schematizzate le caratteristiche del pilastro n°48 alle tabelle Tab.3.10, Tab.3.11.

Tabella 3.10 - Confronto acquisizioni ID_02

ID_02 – Pilastro n°48 – Quadriportico, livello del giardino										
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione e confronto 2° e 3° acquisizione										
Modo	2° acquisizione				3° acquisizione				Confronto 2°-3°	
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	Errore %	MAC
1	4.443	4.433	0.8514	0.22	4.395	4.424	1.093	-0.66	0.20	0.9999
2	6.201	6.221	1.688	-0.32	6.201	6.237	2.026	-0.58	-0.26	0.9975
3	7.129	7.146	1.805	-0.24	7.080	7.100	1.851	-0.28	0.64	0.9954
4	10.64	10.69	1.384	-0.47	10.840	10.840	1.480	0	-1.38	0.9994

Tabella 3.11 – Forme modali ID_02

ID_02 – Pilastro n°48 – Quadriportico, livello del giardino			
Forme modali (3° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	4.424	-0.66	 <p>Flessionale fuori piano</p>

2	6.237	-0.58			Torsionale
3	7.100	-0.28			Flessionale fuori piano
4	10.840	0			Torsionale-flessionale

Confronto ID_01 (pilastro n°58) e ID_02 (pilastro n°48)




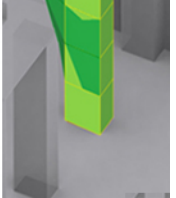


I pilastri n°58 e n°48 appartengono allo stesso lato del quadriportico al livello del giardino e dalla loro comparazione, in termini di prime frequenze, appare evidente la differente risposta che si verifica nei due elementi.

Il pilastro P58, come precedentemente accennato, evidenzia un comportamento anomalo di flessione alla base che può essere convalidata per la notevole riduzione di sezione riscontrata. Inoltre, il pilastro n°58 appare generalmente più rigido, le prime forme flessionali significative di quest'ultimo si hanno alla frequenza di 6,209 Hz mentre per il pilastro n°48 una forma flessionale si ha già a 4,424 Hz in direzione ortogonale al piano dell'architrave.








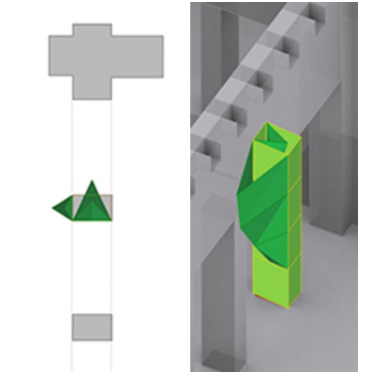







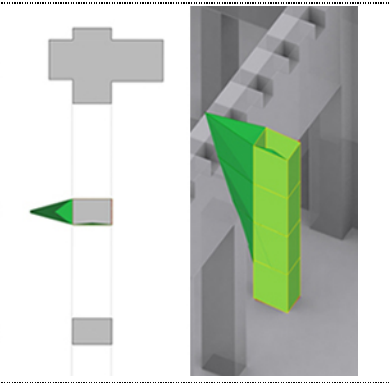



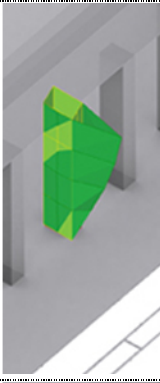



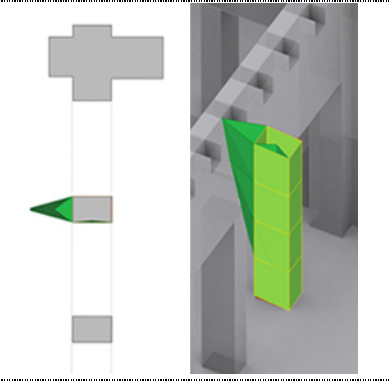




Considerando il secondo modo di vibrare di entrambi i pilastri, con frequenza di 6,209Hz per il P58 e di 6,237 Hz per il P48, è facilmente riconoscibile l'incongruenza delle risposte: flessionale composta per il primo, torsionale per il secondo.

Partendo invece dalla considerazione delle medesime forme modali si arriva allo stesso risultato: la forma flessionale fuori piano che nel P58 si presenta alla frequenza di 8,126 Hz si ritrova nel P48 ma ad una frequenza di 7,100 Hz. Stesso paragone può effettuarsi tra la frequenza di 12,18 Hz del P58 con la frequenza di 10,84 Hz del P48 (Tab.3.12) con la conclusione che il pilastro n°58 risulta generalmente più rigido del n°48.

Tabella 3.12 - Confronto pilastro n°58 e n°48

Confronto tra frequenze e forme modali del pilastro n°58 (ID_01) con il n°48 (ID_02)						
Modo	P58 ID_01 fexp2 EFDD [Hz]	P48 ID_02 fexp3 EFDD [Hz]	Forma modale P58		Forma modale P48	
1	3.594	4.424	P57		P47	
			P58		P48	
			P59		P49	

Capitolo 3

2	6.209	6.237	<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 		<p>P47</p>  <p>P48</p>  <p>P49</p> 	
3	7.409	7.100	<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 		<p>P47</p>  <p>P48</p>  <p>P49</p> 	
4	8.126	10.840	<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 		<p>P47</p>  <p>P48</p>  <p>P49</p> 	
5	12.180		<p>P57</p>  <p>P58</p>  <p>P59</p> 			

ID_03 – Pilastro n°15

Il pilastro P15 vede il confronto tra tre acquisizioni nelle quali la seconda e la terza evidenziano, come nel caso della ID_01, una risposta anomala difficilmente riscontrabile nei comuni elementi strutturali quali i pilastri. Infatti, alle frequenze di 4,646 Hz si verifica una notevole accelerazione alla base del pilastro come illustrato in Tab.3.15, modo 2. Il primo modo (4,070 Hz), invece, è il flessionale agente nel piano ortogonale all'architrave. Alla frequenza di 5,416 Hz corrispondente al terzo modo si ha la stessa risposta di tipo flessionale ma nella direzione del suo lato corto, ovvero nel piano. La forma torsionale corrisponde al picco individuato alla frequenza di 5,657 Hz, modo 4. A 7,265 Hz si genera un comportamento flessionale fuori piano, in direzione principale nord-sud.

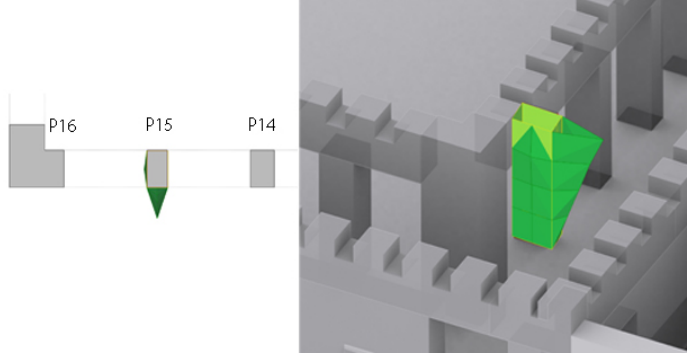
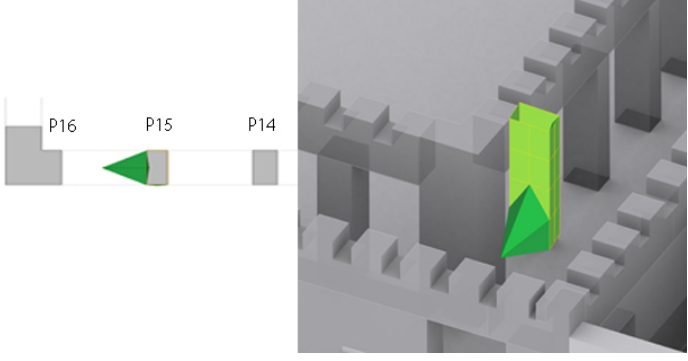
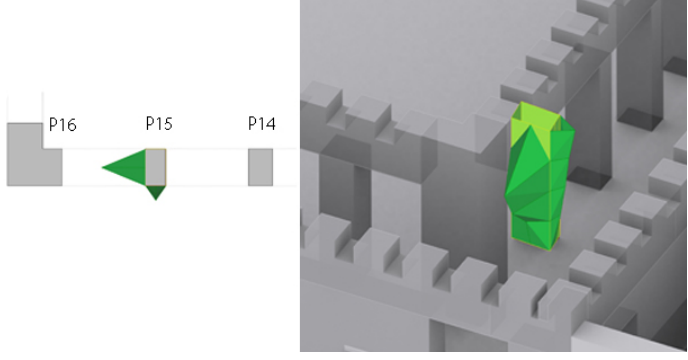
Tabella 3.13 - Confronto acquisizioni ID_03

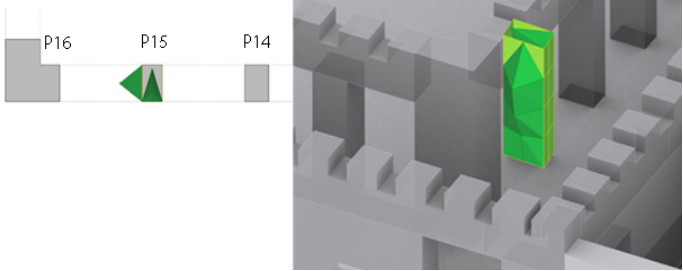
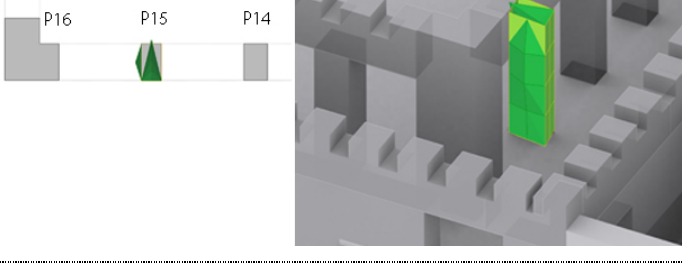
ID_03 – Pilastro n°15 – Quadriportico, livello del giardino												
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione												
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				3° acquisizione			
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %
1	3.125	3.112	1.065	0.42	4.004	4.000	0.8896	0.10	4.004	4.070	5.167	-1.62
2	4.834	4.890	1.717	-1.14	4.639	4.646	0.5887	-0.15	4.639	4.646	0.5921	-0.15
3	5.420	5.425	1.122	0	5.42	5.405	0.9294	0.28	5.420	5.416	1.017	0.07
4	5.664	5.675	1.269	-0.19	5.664	5.617	0.7610	0.84	5.664	5.657	1.025	0.12
5	7.324	7.316	1.426	0.10	7.324	7.335	1.2690	-0.15	7.324	7.265	1.631	-0.52

Tabella 3.14 – Confronto acquisizioni ID_03

ID_03 – Pilastro n°15 – Quadriportico, livello del giardino						
Confronto EFDD tra 1° 2° 3° acquisizione						
Modo	Confronto 1°-2°		Confronto 1°-3°		Confronto 2°-3°	
	Errore %	MAC	Errore %	MAC	Errore %	MAC
1	-22.2	0.9996	-23.53	0.9995	-1.72	0.9998
2	5,25	0.0153	5.25	0.0082	0	0.9965
3	0.37	0.9811	0.17	0.9651	-0.20	0.9872
4	1.03	0.9963	0.32	0.9692	0.71	0.9764
5	-0.25	0.9955	0.71	0.9957	0.96	0.9956

Tabella 3.15 – Forme modali ID_03

ID_03 – Pilastro n°15 – Quadriportico, livello del giardino			
Forme modali (3° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	4.070	-1.62	 <p>Flessionale fuori piano</p>
2	4.646	-0.15	 <p>Flessionale della base nel piano</p>
3	5.416	0.07	 <p>Flessionale nel piano</p>

4	5.657	0.12	 <p>Torsionale</p>
5	7.265	-0.52	 <p>Flessionale fuori piano</p>

ID_06 – Quadriportico, lati sud e ovest

Le difficoltà legate all'individuazione dei picchi nel grafico della SVD e dell'accoppiamento dei modi ha suggerito di elaborare separatamente i lati sud e ovest dello stesso quadriportico, limitatamente alle prime frequenze poiché è questa la banda che presenta maggiori difficoltà (fig.3.48).

La scomposizione ha permesso di confrontare i due architravi sia in termini di frequenze fondamentali sia di forme modali.

Per il lato sud le frequenze e le forme modali riassunte in Tab.3.16 corrispondono a quelle individuate nell'elaborazione globale identificando la forma flessionale semplice a 2,655 Hz, la torsionale a 3,149 Hz e la flessionale del 3°modo a 3,563 Hz.

L'elaborazione del lato ovest (Tab.3.17) ha rilevato la presenza del modo flessionale semplice a 2,588 Hz oltre agli altri modi corrispondenti alle forme individuate anche nell'analisi globale della ID_06 esposta nel seguito.

Mettendo a confronto, in termini di frequenza, i due architravi si può concludere che manifestano un comportamento unitario.

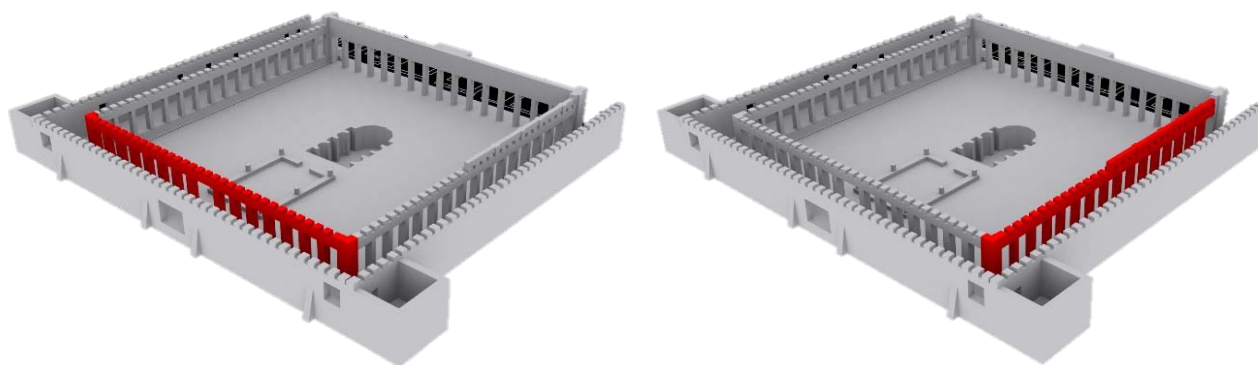


Figura 3.48 - Localizzazione della ID_06 in modo separato, a sinistra il lato ovest, a destra il lato sud

Tabella 3.16 – Forme modali ID_06, lato sud

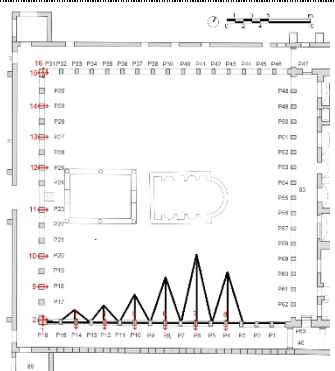
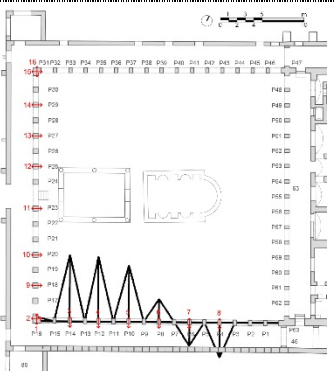
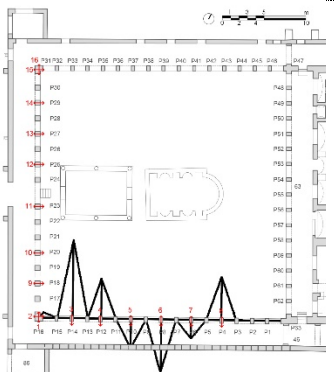
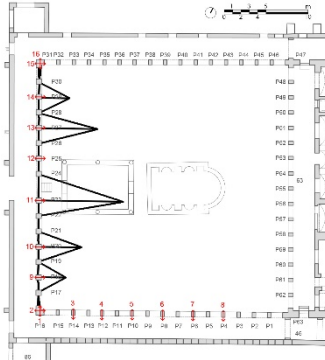
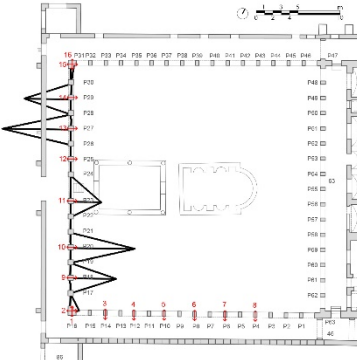
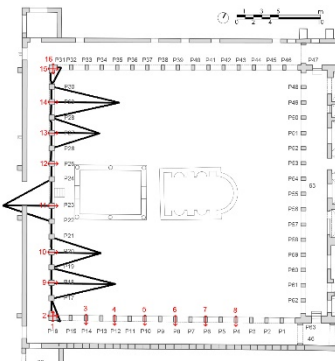
ID_06 – Lato SUD – Quadriportico, livello del giardino			
Forme modali			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	2.655	-0.67	 <p>Flessionale 1° modo</p>
2	3.149	0.79	 <p>Flessionale 2° modo</p>
3	3.563	0.03	 <p>Flessionale 3° modo</p>

Tabella 1.17 – Forme modali ID_06, lato ovest

ID_06 – Lato OVEST – Quadriportico, livello del giardino			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	2.613	-0.95	 <p>Flessionale 1° modo</p>
2	3.241	-0.55	 <p>Flessionale 2° modo</p>
3	4.006	-0.05	 <p>Flessionale 3° modo</p>

ID_06 – Quadriportico, lati sud e ovest

La ID_06 quindi caratterizza il comportamento globale dei lati sud e ovest del quadriportico (fig.3.49). Dal grafico della SVD è stato possibile identificare otto modi principali. In questo caso, il confronto tra le varie acquisizioni, correlato alle osservazioni degli indici di MAC derivanti dalle acquisizioni combinate, ha permesso di individuare un accoppiamento delle forme modali nei diversi picchi del grafico SVD. Alle frequenze più basse si riconosceva l'attivazione delle forme flessionali riguardanti soprattutto il lato sud per la prima e terza acquisizione e il lato ovest per la seconda.

In relazione alla Tab.3.20, le prime forme modali sono riconducibili a una forma flessionale semplice che coinvolge sia il portico sud (2,662 Hz) sia quello ovest (2,610 Hz). Il terzo e il quarto modo descrivono la forma flessionale del 2° modo rispettivamente a 3,156 Hz per il lato sud e a 3,249 Hz per il lato ovest.

I successivi modi di vibrare, ossia il 5 e il 6 trovano ancora corrispondenza con i modi individuati nell'elaborazione dei due architravi studiati separatamente e descrivono le forme flessionali del terzo modo per i lati sud e ovest.

Le frequenze di 4.244 Hz del lato sud e 4,956 Hz del lato ovest, corrispondenti alle forme modali 7 e 8, caratterizzano una risposta flessionale composta

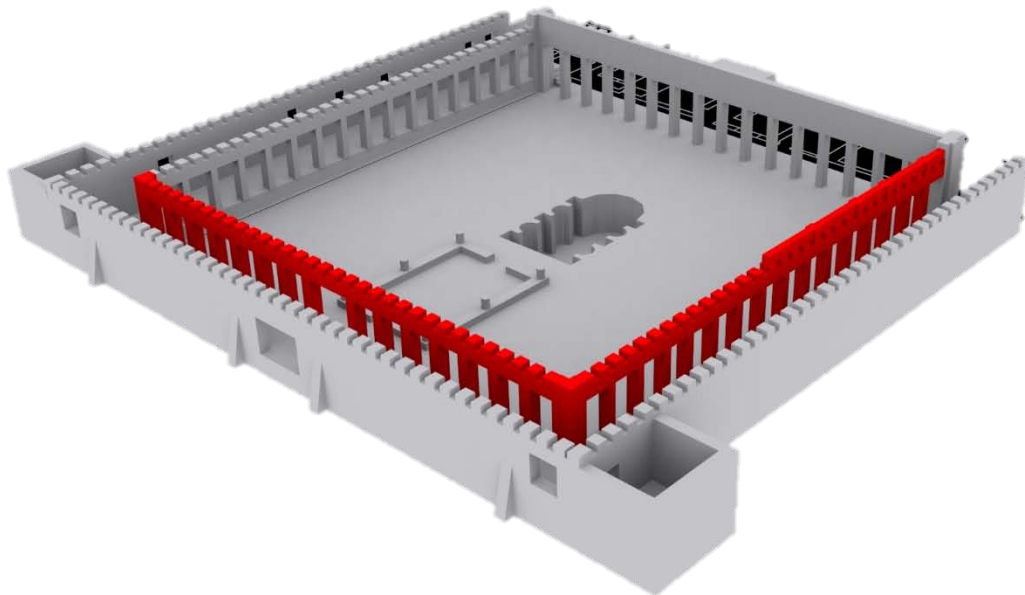


Figura 3.49 - localizzazione ID_06

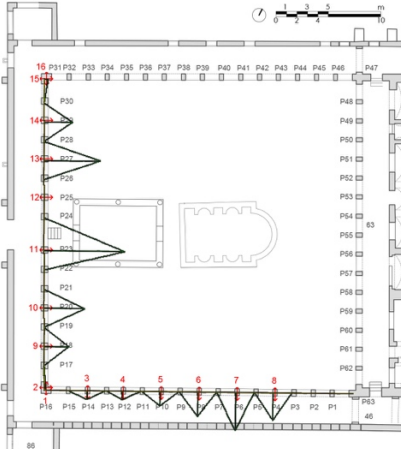
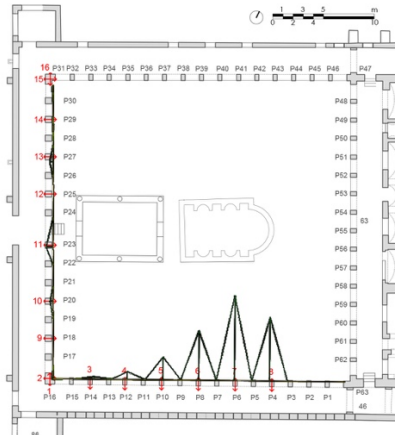
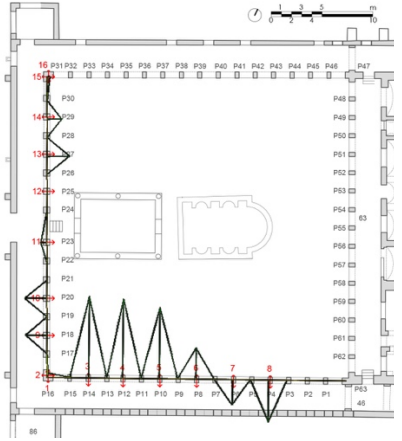
Tabella 3.18 – confronto acquisizioni ID_06

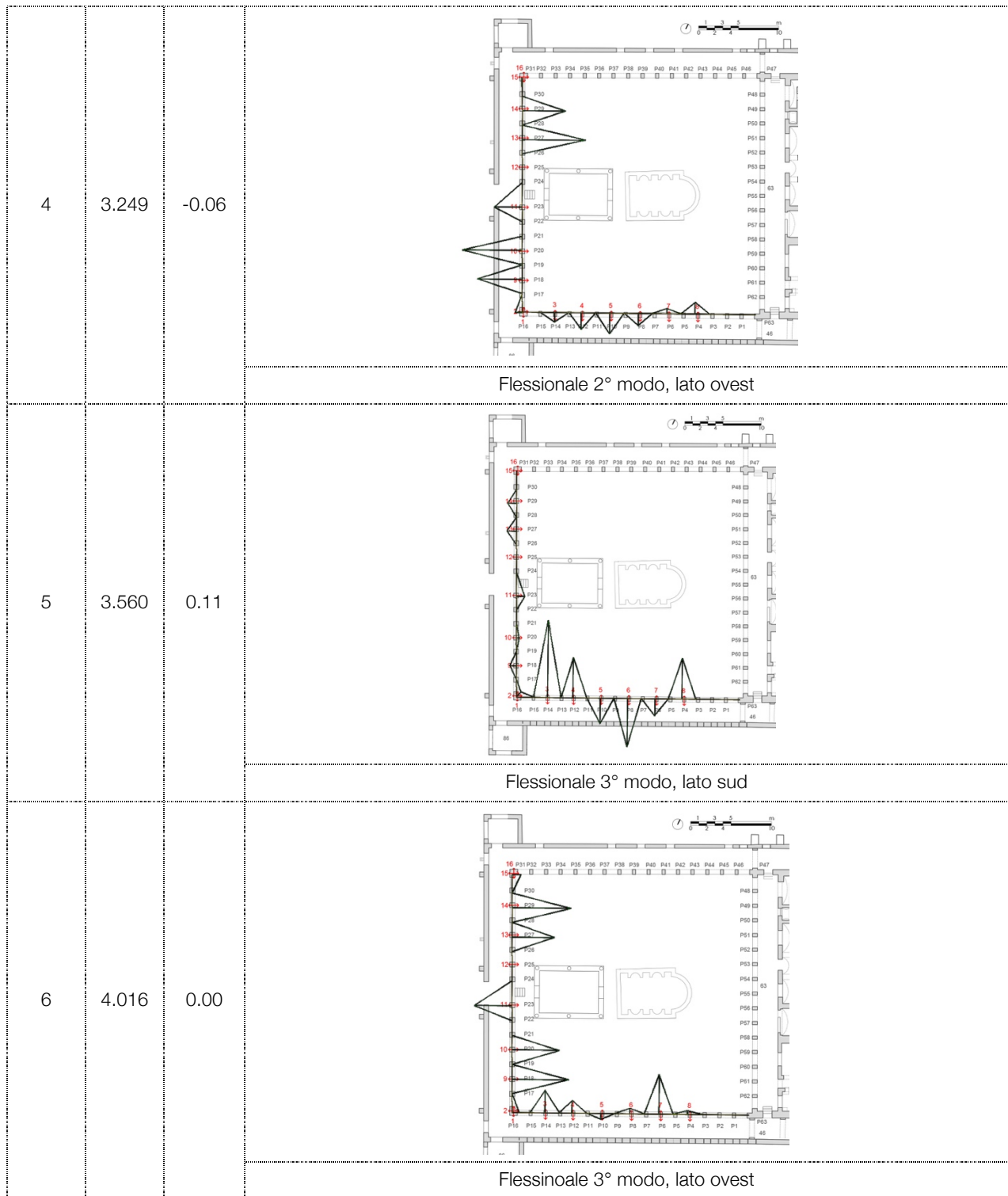
ID_06 – Lati sud e ovest – Quadriportico, livello del giardino												
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione												
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				3° acquisizione			
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %
1	2.612	2.610	0.255	0.08	2.6	2.6	0.609	0.00	2.6	2.6	0	0.00
2	2.661	2.662	0.763	-0.05	2.649	2.654	0.776	-0.19	2.649	2.648	0.396	0.04
3	3.137	3.156	0.965	-0.60	3.149	3.159	0.881	-0.32	3.137	3.137	0.754	0.00
4	3.247	3.249	0.685	-0.06	3.235	3.236	0.312	-0.03	3.259	3.259	0	0.00
5	3.564	3.560	1.011	0.11	3.54	3.542	0.612	-0.06	3.516	3.512	0.314	0.11
6	4.016	4.016	0	0.00	3.992	3.989	0.347	0.08	3.955	3.955	0	0.00
7	4.248	4.244	0.836	0.09	4.236	4.242	0.681	-0.14	4.26	4.26	0	0.00
8	4.956	4.956	0.112	0.00	4.956	4.956	0.124	0.00	4.956	4.955	0.142	0.02

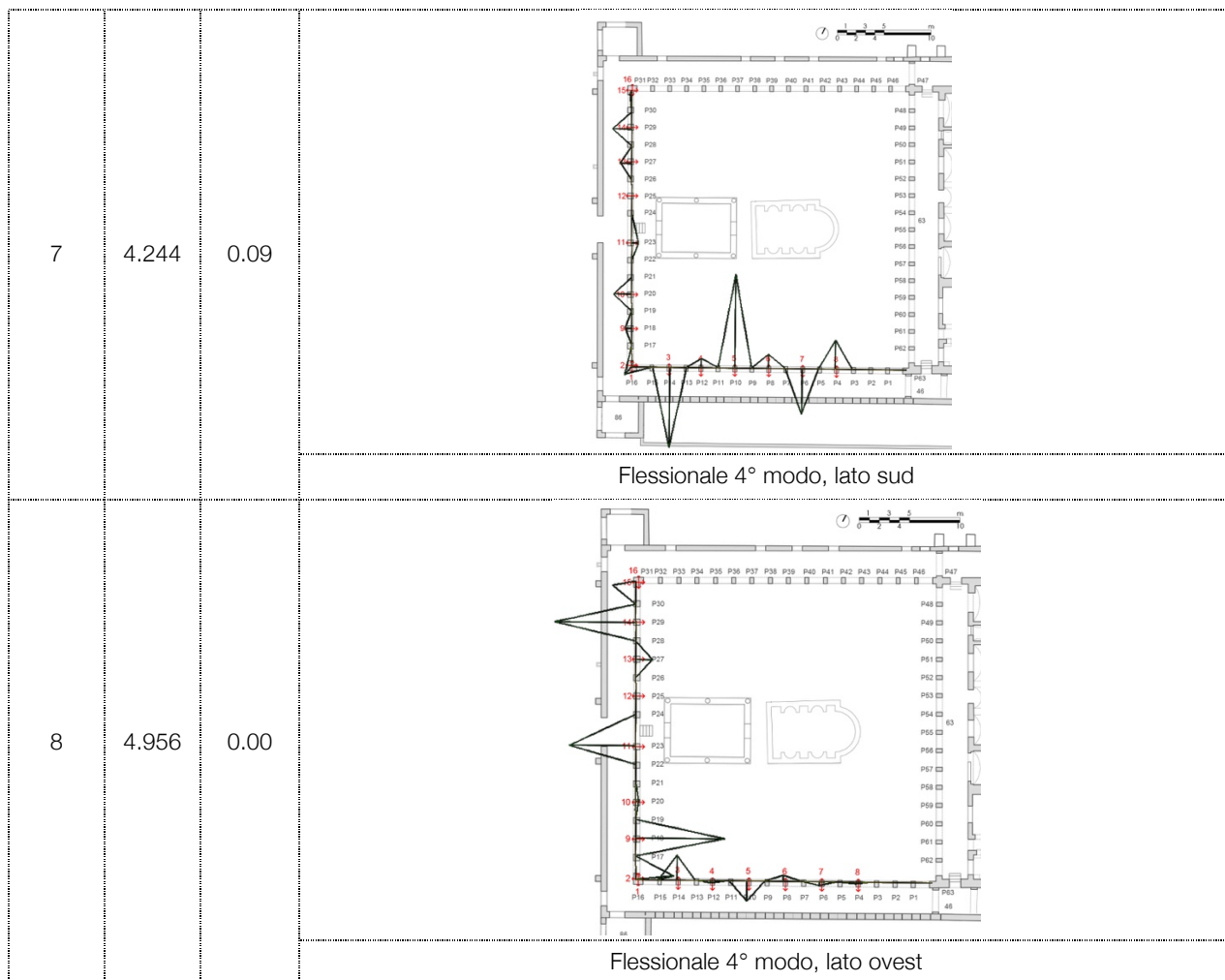
Tabella 3.19 – Confronto acquisizioni ID_06

ID_06 – Lati sud e ovest – Quadriportico, livello del giardino						
Confronto EFDD tra 1° 2° 3° acquisizione						
Modo	Confronto 1°-2°		Confronto 1°-3°		Confronto 2°-3°	
	Errore %	MAC	Errore %	MAC	Errore %	MAC
1	0.38	0	0.38	0.5604	0.00	0.1279
2	0.30	0.9601	0.53	0.9751	0.23	0.9733
3	-0.09	0.9953	0.61	0.9561	0.70	0.9482
4	0.40	0.9603	-0.31	0.8298	-0.71	0.7819
5	0.51	0.9958	1.37	0.9588	0.85	0.9571
6	0.68	0.6385	1.54	0.1303	0.86	0.576
7	0.05	0.9746	-0.38	0.9636	-0.42	0.9514
8	0.00	0.9982	0.02	0.9943	0.02	0.9956

Tabella 3.20 – Forme modali ID_06

ID_06 – Lati sud e ovest – Quadriportico, livello del giardino			
Forme modali (1° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	2.610	0.08	 <p>Flessionale lato ovest</p>
2	2.662	-0.05	 <p>Flessionale lato sud</p>
3	3.156	-0.60	 <p>Flessionale 2° modo, lato sud</p>





Confronto ID_03 con ID_06

Essendo, il pilastro n°15, compreso nell'identificazione dinamica ID_06 è possibile eseguire un veloce confronto tra il comportamento del singolo elemento con quello globale degli architravi sud e ovest sopra discusso. Il risultato che si ottiene è l'effettiva corrispondenza delle forme modali alla frequenza di 4,070 Hz della ID_03 (P15) e alla frequenza di 4,016 Hz del portico globale. Nello stesso punto, alla frequenza si 4,6 Hz, si nota una accentuata accelerazione nella direzione est-ovest. Al modo 8 della ID_06 (4,956 Hz) si deduce una risposta flessionale fuori piano soprattutto del lato ovest, che corrisponde ad una risposta nel piano del lato sud. Anche le risposte flessionali alle frequenze maggiori indicano l'aderenza del modo di vibrare elaborato per il singolo P15 a quello individuato nello stesso punto nella ID_06.

ID_04 – Interno Villa, muri sud e nord separati

Per incrementare e verificare l'affidabilità dei risultati, anche in questo caso sono state effettuate delle elaborazioni separate per muro sud e per il muro nord.

Il primo modo di vibrare della parete nord alla frequenza di 3,266 Hz è la più significativa con l'esplicita dimostrazione che i setti trasversali presenti non influenzano il comportamento globale della parete, riscontrabile anche nel secondo modo di vibrare alla frequenza di 4,991 Hz (Tab.3.24). Il secondo (5,217 Hz), terzo (6,984 Hz) e quarto modo (9,042 Hz) della parete sud, invece, confermano lo scarso ammortamento con il setto delimitante gli spazi 14 e 13 (Tab.3.22). Infine, le forme modali della parete sud alla frequenza di 10,09 Hz e quella della parete nord a 10,34 Hz (quinto modo di vibrare per entrambe) non corrispondono e questo dimostra, per ognuna di esse, una certa indipendenza del proprio comportamento, risultato plausibile data la mancanza di orizzontamenti in grado di distribuire le forze.

Tabella 3.21 – Confronto acquisizioni ID_04, muro sud

ID_04 – Interno, muri paralleli SUD – Piano terra											
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione e confronto 1° e 2° acquisizione											
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				Confronto 1°-2°		
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	Errore %	MAC	
1	3.809	3.756	4.846	1.41	3.223	4.983	0.799	-35.32	-24.62	0.9756	
2	5.176	5.217	2.157	-0.79	5.176	5.217	1.725	-0.78	0	0.9993	
3	6.934	6.941	1.587	-0.10	7.031	6.984	0.8074	0.67	-0.61	0.9912	
4	8.984	8.994	2.405	-0.11	8.984	9.042	1.269	-0.64	-0.53	0.9899	
5	10.06	10.14	1.770	-0.79	10.06	10.09	1.948	-0.29	0.49	0.9805	

Tabella 3.22 – Forme modali ID_04, muro sud

ID_04 – Interno, muri paralleli SUD – Piano terra			
Forme modali (2° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	4.983	-3,53	<p>Flessionale acc.11-15</p>

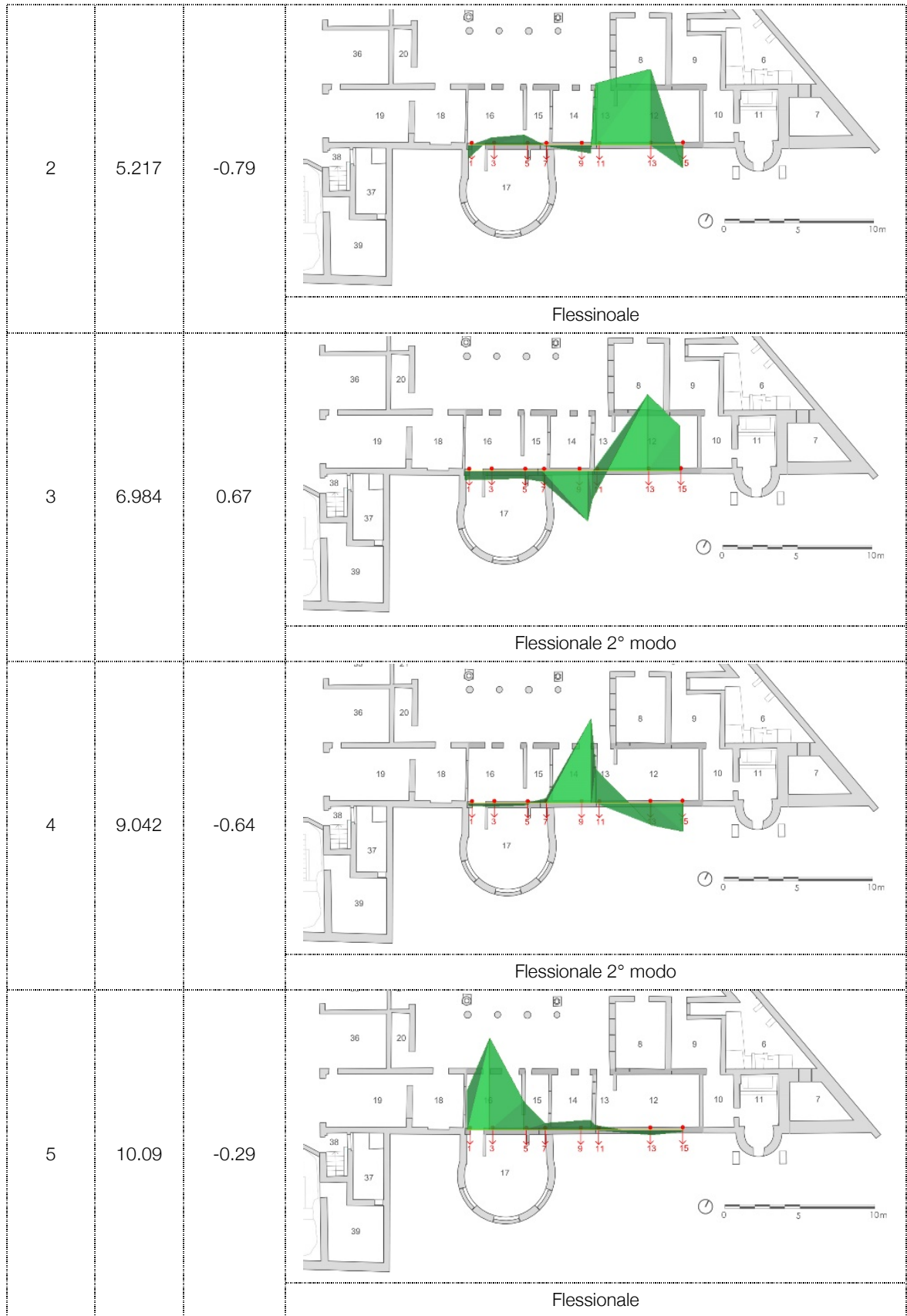
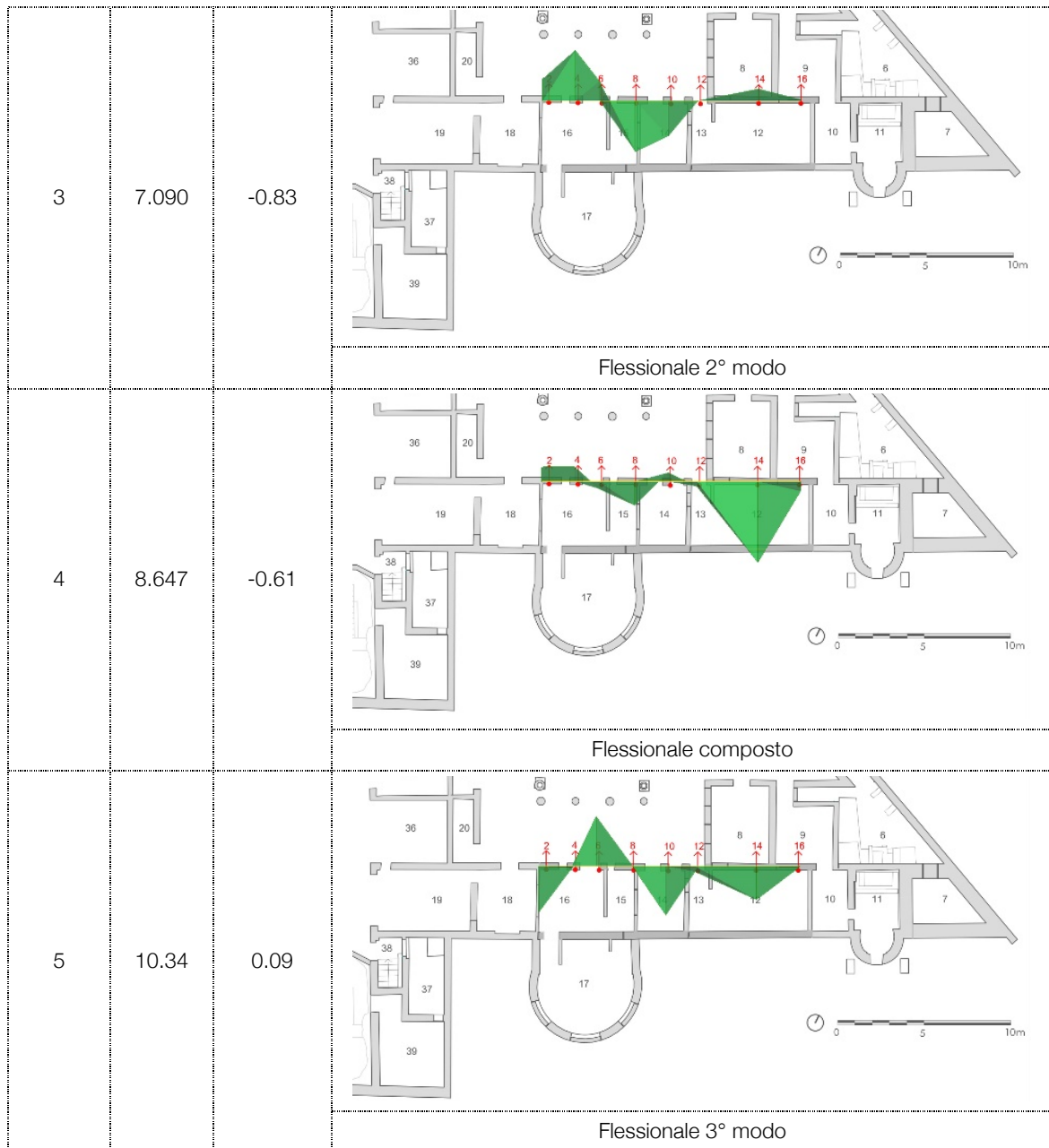


Tabella 3.23 – Confronto acquisizioni ID_04, muro nord

ID_04 – Interno, muri paralleli NORD – Piano terra											
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione e confronto 1° e 2° acquisizione											
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				Confronto 1°-2°		
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	Errore %	MAC	
1	3.320	3.265	2.51	1.68	3.320	3.266	2.648	1.65	-0.03	0.998	
2	4.980	4.991	1.523	-0.22	4.980	4.991	1.533	-0.22	0	0.994	
3	7.031	7.046	3.591	-0.21	7.031	7.090	3.483	-0.83	-0.62	0.9908	
4	8.594	8.607	2.023	-0.15	8.594	8.647	1.740	-0.61	-0.46	0.9978	
5	10.16	10.20	2.282	-0.39	10.35	10.34	1.605	0.09	-1.35	0.9949	

Tabella 3.24 – Forme modali ID_04, muro nord

ID_04 – Interno, muri paralleli NORD – Piano terra			
Forme modali (2° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	3.266	1.65	
2	4.991	-0.22	<p>Flessionale</p> <p>Flessionale 1° modo</p>



ID_04 – Interno Villa

La prova ID 04 riguarda i due paramenti murari del piano terra collegati da setti trasversali di cui si intende valutare l'eventuale comportamento globale ed individuare le possibili strutture non ammortate che la compongono (fig.3.50). Confrontando le forme modali delle due acquisizioni il risultato ottenuto conferma quanto esposto nell'elaborazione precedente indicando la scarsa collaborazione tra le due murature.

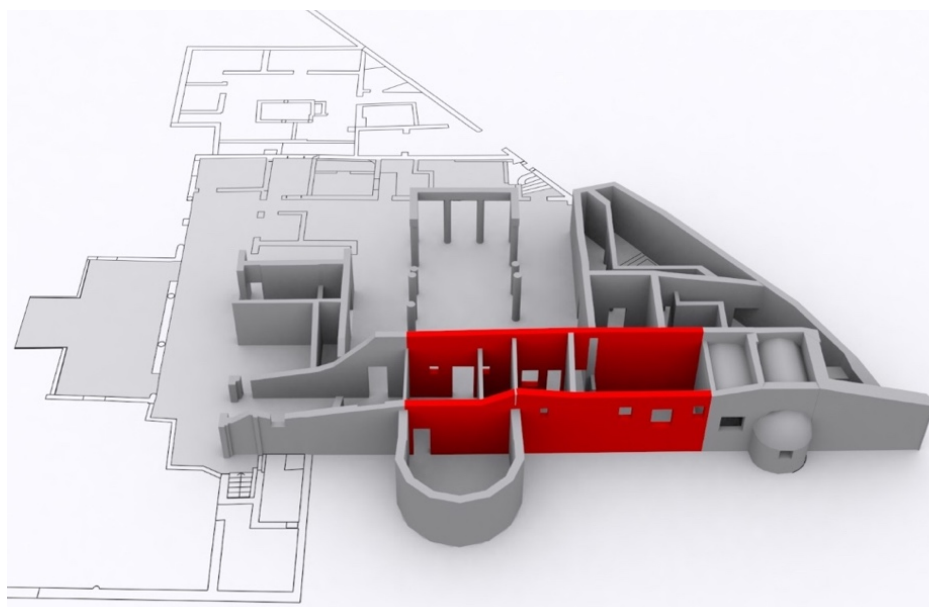


Figura 3.50 - Localizzazione prova ID_04

Il primo modo di vibrare (3.265 Hz) di Tab.3.26 evidenzia un comportamento flessionale del tratto di muro compreso tra gli accelerometri 2 e 10, mentre gli altri accelerometri misurano accelerazioni infinitesime rispetto ai primi. Ciò indica che la porzione di parete in oggetto risulta libera da ogni vincolo nella sua parte sinistra, rendendo ininfluyente la presenza dei setti trasversali che dividono le stanze 18-16, 16-15 e 15-14.

La seconda forma modale alla frequenza di 5.209 Hz manifesta una flessione del muro d'ambito sud nella porzione tra gli accelerometri 11 e 15. Tale modo di vibrare evidenzia una parziale discontinuità nel comportamento del paramento murario in corrispondenza dell'accelerometro 11, dovuta alla presenza di setti perpendicolari al muro e dell'edera semicircolare.

Alla frequenza di 6.991 Hz si assiste ad un comportamento torsionale della porzione sud delle stanze 16, 5 e 14.

I successivi modi risultano più articolati e complessi da interpretare, in quanto è difficile individuare forme modali globali e le varie porzioni si comportano come elementi strutturali indipendenti gli uni dagli altri: alle frequenze di 8.686 Hz, 8.984 Hz e 10.08 Hz è evidente la scarsa collaborazione con il setto trasversale tra le stanze 14 e 12 risultante dall'osservazione delle accelerazioni degli accelerometri 9 e 11. Agli stessi modi (n° 4,5,6) le forme modali affermano la non unitarietà di comportamento della porzione indagata con

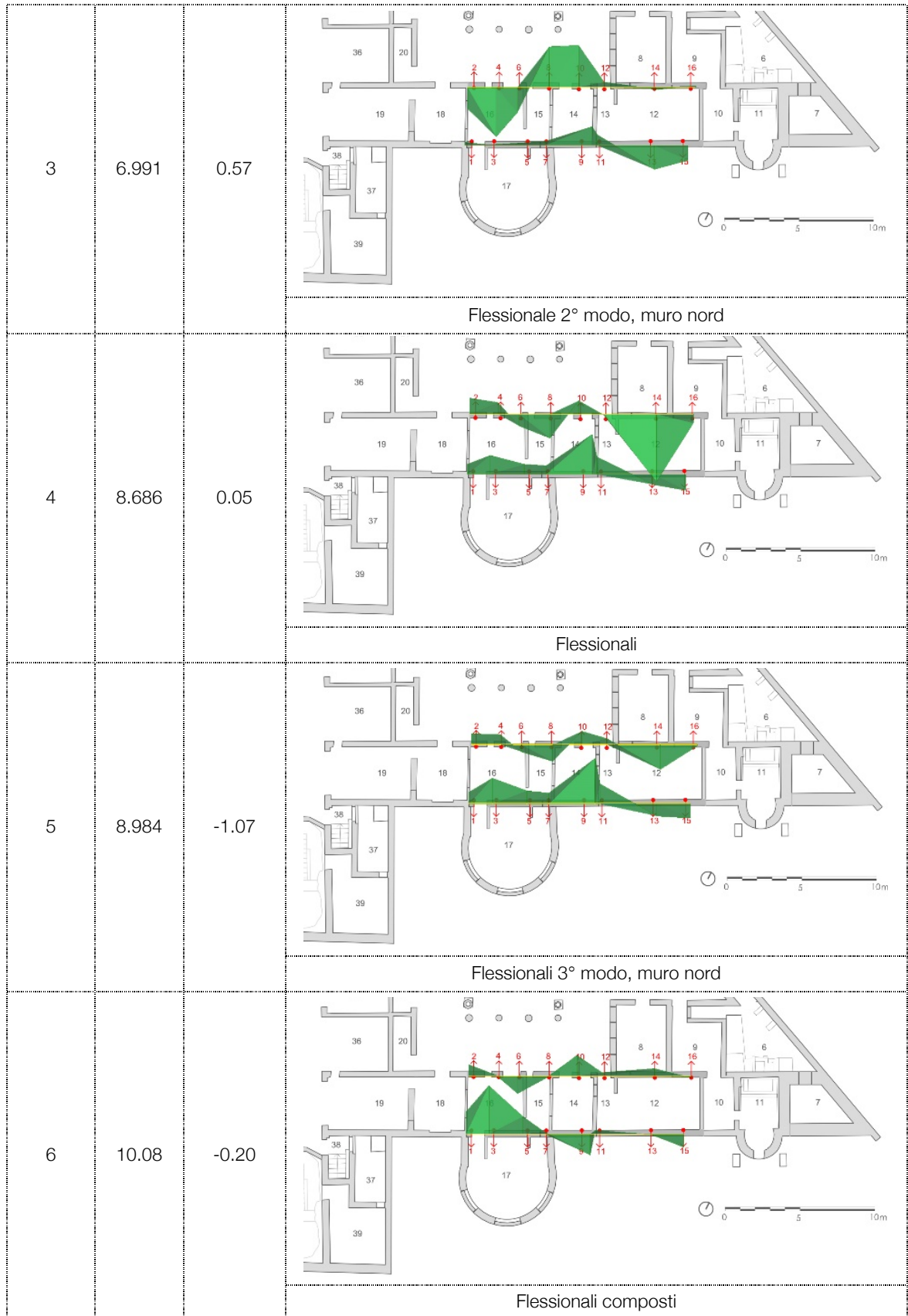
la presenza dei setti trasversali che non risultano ammortati alle pareti oggetto di prova o scarsamente collaboranti come quello indicato nella descrizione della seconda forma modale.

Tabella 3.25 – Confronto acquisizioni ID_04

ID_04 – Interno, muri paralleli – Piano terra											
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione e confronto 1° e 2° acquisizione											
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				Confronto 1°-2°		
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	Errore %	MAC	
1	3.223	3.265	2.511	-1.28	3.320	3.266	2.647	1.65	-0.03	0.9972	
2	5.176	5.209	1.425	-0.63	5.176	5.219	1.359	-0.82	-0.19	0.9973	
3	7.031	6.991	1.841	0.57	7.031	7.024	1.707	0.09	-0.46	0.9962	
4	8.691	8.686	0.980	0.06	8.594	8.626	1.127	-0.37	0.69	0.7751	
5	8.887	8.984	1.611	-1.08	9.082	9.012	1.593	0.77	-0.31	0.9911	
6	10.06	10.08	0.807	-0.20	10.060	10.070	1.614	-0.09	0.10	0.9314	

Tabella 3.26 – Forme modali ID_04

ID_04 – Interno, muri paralleli – Piano terra			
Forme modali (1° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	3.265	-1.28	
			Flessionale, muro nord
2	5.209	-0.63	
			Flessionale, muro sud



ID_05 – Muro d'ambito est

L'elaborazione dei dati del muro d'ambito est (fig.3.51) è stata effettuata sulla base di due acquisizioni le cui frequenze e modi sono schematizzati in tabella 3.27 e 3.28. Il primo modo di vibrare, con una frequenza di 4.241 Hz, riporta una forma modale di tipo flessionale fuori piano del paramento murario, particolarmente accentuato in corrispondenza dell'accelerometro 2. Ciò è dovuto ad una mancanza di vincoli importanti per la parete in oggetto, ad eccezione del pilastro angolare vicino all'ingresso, in cui l'accelerometro 1 misura uno spostamento minimo, e del nucleo angolare all'estremità inferiore destra della Villa.

La seconda forma modale ($f=5.258$ Hz) evidenzia un moto flessionale del secondo modo, concentrato nella zona degli accelerometri 3 e 4, mentre alle stesse frequenze, il nucleo angolare a due paramenti accoppiati non è ancora attivato.

Le forme modali 3 e 4 rispettivamente a 6.129Hz e 10.57Hz descrivono una risposta flessione del terzo e quarto modo. Al modo 4 si nota l'attivazione modale del nucleo angolare e del pilastro in prossimità dell'ingresso, indice che le due porzioni angolare sono caratterizzate da una rigidità maggiore della parete in facciata.

In conclusione, dalla prova si evince la mancanza di vincoli importanti per la parete d'ambito, che risulta vincolata solo a questi due elementi d'angolo.

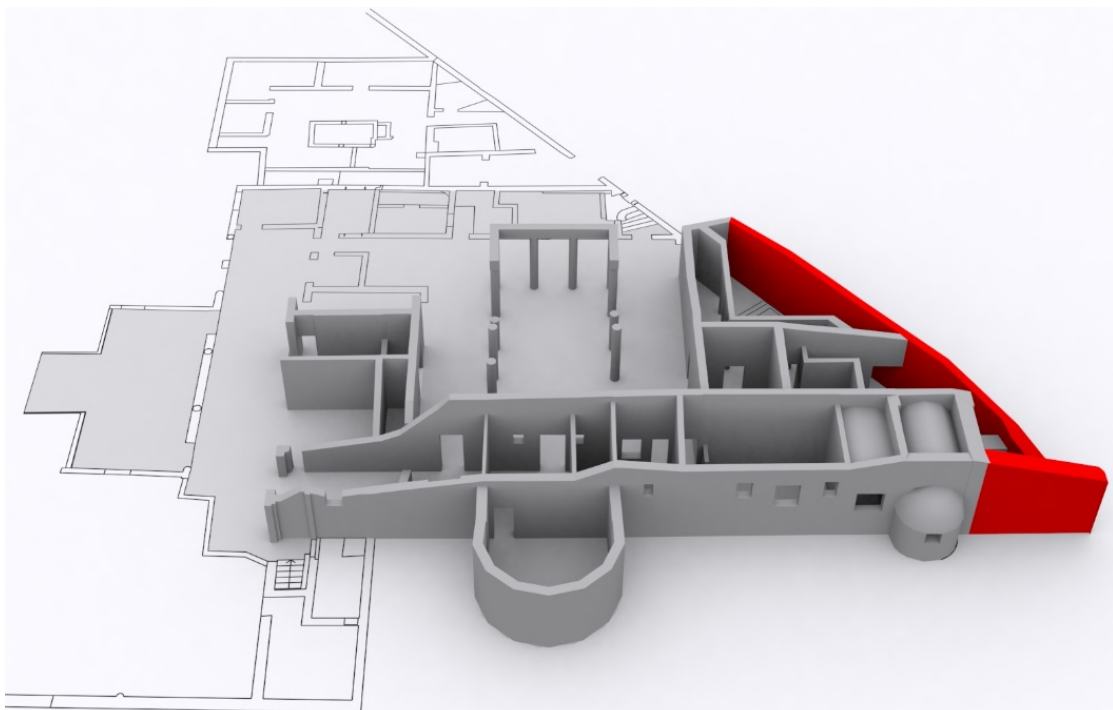
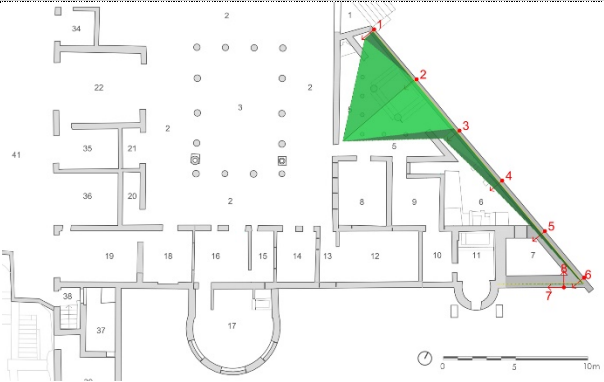



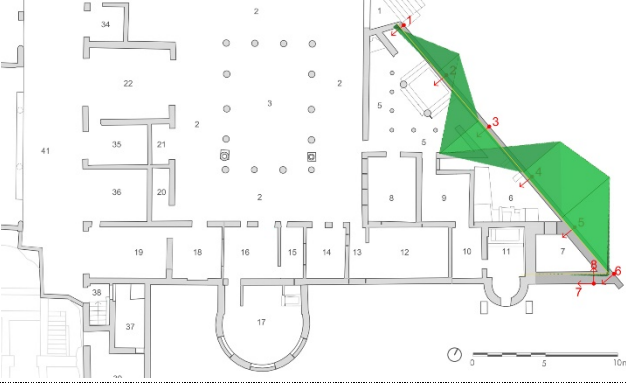
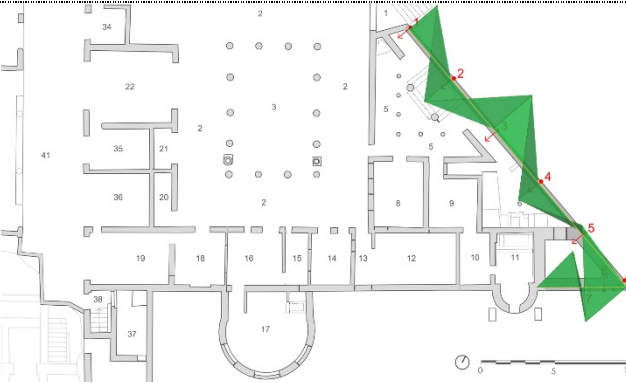
Figura 3.51 - Localizzazione prova ID_05

Tabella 3.27 – Confronto acquisizioni ID_05

ID_05 – Muro d’ambito est – Piano terra										
Confronto FDD-EFDD per ogni acquisizione e confronto 1° e 2° acquisizione										
Modo	1° acquisizione				2° acquisizione				Confronto 1°-2°	
	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	f [Hz] FDD	f [Hz] EFDD	ξ %	Errore %	Errore %	MAC
1	4.248	4.234	1.147	0.33	4.248	4.241	1.122	0.17	-0.16	0.9997
2	5.225	5.262	1.340	-0.70	5.225	5.258	1.167	-0.63	0.07	0.9895
3	6.152	6.136	1.565	0.26	6.152	6.129	1.657	0.37	0.11	0.9996
4	10.30	10.33	0.6823	-0.29	10.60	10.57	1.559	0.28	-2.27	0.9651

Tabella 2.28 – Forme modali ID_05

ID_05 – Muro d’ambito est – Piano terra			
Forme modali (2° acquisizione)			
Modo	f [Hz] EFDD	Errore %	Forma modale
1	4.241	0.17	 <p>Flessionale 1° modo</p>
2	5.258	-0.63	 <p>Flessionale 2° modo</p>

3	6.129	0.37	 <p>Flessionale 3° modo</p>
4	10.57	0.28	 <p>Flessionale 4° modo– attivaz. Muro sud</p>

Capitolo 4

Valutazione della sicurezza sismica

4. Valutazione della sicurezza sismica

L'edilizia storica in muratura si manifesta attraverso un insieme di strutture, tipologie e tecniche costruttive estremamente vario e complesso. Tra tutte, soprattutto la muratura storica è da considerarsi eterogenea, anisotropa e con notevoli variazioni all'interno dello stesso edificio che rende la valutazione della sicurezza sismica un'operazione fortemente complessa e delicata.

L'analisi del comportamento strutturale dei manufatti storici e la valutazione della loro sicurezza risultano inevitabilmente condizionate da rilevanti incertezze nella definizione delle condizioni di vincolo tra gli elementi e delle proprietà meccaniche dei materiali.

4.1 Normativa di riferimento

L'analisi del comportamento strutturale condotto per Villa Diomede fa riferimento alla Circolare del 2 febbraio 2009, n. 617, nella quale, riguardo gli edifici esistenti in muratura, viene indicato che la valutazione della sicurezza sismica "richiede la verifica degli stati limite definiti al § 3.2.1. delle NTC, con le precisazioni riportate al § 8.3 delle NTC".⁵⁷

Tra i contenuti della Normativa sono indicate le situazioni in cui è obbligatorio sottoporre le costruzioni esistenti in muratura a valutazione della sicurezza, permettendo di stabilire, per esempio, se l'uso della costruzione possa continuare senza subire interventi, debba essere modificato attraverso l'imposizione di limitazioni o cautele nell'uso o se sia necessario procedere ad aumentare o ripristinare la capacità portante.⁵⁸ Successivamente, sempre all'interno della norma, vengono classificati anche gli interventi secondo tre diverse categorie: la prima comprende quegli interventi di adeguamento atti a conseguire pienamente i livelli di sicurezza richiesti nelle NTC, la seconda riguarda gli interventi di miglioramento finalizzati ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, senza però raggiungere i livelli richiesti dalle NTC, e l'ultima interessa le riparazioni o gli interventi puntuali che interessano elementi isolati, e che comportino in ogni caso un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

Per Villa Diomede, che vanta del riconoscimento di interesse culturale, sarebbe necessario attenersi alle ultime due categorie sopra indicate, concetto richiamato nelle "Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008".⁵⁹ Quest'ultima Direttiva è stata redatta con l'intento di specificare un percorso di conoscenza, valutazione del livello di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche e progetto degli eventuali interventi, concettualmente analogo a quello

⁵⁷ Circolare, § C8.7.1.1, Requisiti di sicurezza.

⁵⁸ NTC 2008 cap. 8.3, valutazione della sicurezza.

⁵⁹ Linee guida, § 2.2 Criteri per la valutazione della sicurezza sismica e dell'efficacia dell'intervento.

previsto per le costruzioni non tutelate, ma opportunamente adattato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale; la finalità è quella di formulare, nel modo più oggettivo possibile, il giudizio finale sulla sicurezza e sulla conservazione garantite dall'intervento di miglioramento sismico. In particolare, il documento è riferito alle sole costruzioni in muratura.⁶⁰

Nel caso dei manufatti architettonici appartenenti al patrimonio culturale esistono oggettive difficoltà a definire procedure di verifica dei requisiti di sicurezza analoghe a quelle applicate per gli edifici ordinari, in quanto la loro varietà tipologica e singolarità costruttiva (anche dovuta alle trasformazioni subite nel corso della storia dell'edificio e allo stato di conservazione) non consentono di indicare una strategia univoca ed affidabile di modellazione ed analisi. In queste valutazioni spesso si riscontrano incertezze in merito sia al modello di comportamento, sia ai parametri che lo definiscono.⁶¹

Al paragrafo 8.7.1 del D.M. 14/01/2008 si specifica come nelle costruzioni esistenti in muratura soggette ad azioni sismiche, particolarmente negli edifici, si possono manifestare meccanismi locali e meccanismi d'insieme. I meccanismi locali interessano singoli pannelli murari o più ampie porzioni della costruzione, e sono favoriti dall'assenza o scarsa efficacia dei collegamenti tra pareti e orizzontamenti e negli incroci murari. I meccanismi globali sono quelli che interessano l'intera costruzione e impegnano i pannelli murari prevalentemente nel loro piano. La sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi i tipi di meccanismo.

Per l'analisi sismica dei meccanismi locali si può far ricorso ai metodi dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie, tenendo conto, anche se in forma approssimata, della resistenza a compressione, della tessitura muraria, della qualità della connessione tra le pareti murarie, della presenza di catene e tiranti. Con tali metodi è possibile valutare la capacità sismica in termini di resistenza applicando un opportuno fattore di struttura o di spostamento determinando l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo.

L'analisi sismica globale deve considerare, per quanto possibile, il sistema strutturale reale della costruzione, con particolare attenzione alla rigidezza e resistenza dei solai e all'efficacia dei collegamenti degli elementi strutturali. Nel caso di muratura irregolare, la resistenza a taglio di calcolo per azioni nel piano di un pannello in muratura potrà essere calcolata facendo ricorso a formulazioni alternative rispetto a quelle adottate per opere nuove, purché di comprovata validità.

Riassumendo, per la valutazione degli edifici esistenti è da considerarsi anche l'analisi dei meccanismi locali. Quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi, cioè meccanismi locali, la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico. In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali, purché la totalità delle forze sismiche

⁶⁰ Linee guida § 1.1 - Finalità e criteri

⁶¹ Linee guida § 2.2 – Criteri per la valutazione della sicurezza sismica e dell'efficacia dell'intervento

sia coerentemente ripartita sui meccanismi locali considerati e si tenga correttamente conto delle forze scambiate tra i sottosistemi strutturali considerati.⁶²

Per quanto riguarda le verifiche con riferimento ai meccanismi locali di danno o collasso nel §C8.7.1.6 queste devono essere eseguite seguendo, tra i possibili modelli di riferimento, l'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie, secondo l'approccio cinematico, che si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale meccanismo.

Il criterio di verifica proposto nella Circolare (§C8A.4) prevede l'applicazione del principio dei lavori virtuali ad ogni meccanismo prescelto con cui è possibile valutare la capacità sismica in termini di resistenza (analisi cinematica lineare) o di spostamento, attraverso una valutazione in spostamenti finiti (analisi cinematica non lineare).

Nello studio di Villa Diomede il modello di analisi è stato elaborato con le dovute semplificazioni effettuando una serie di verifiche locali condotte sui singoli macroelementi, ovvero su delle porzioni più o meno estese della struttura muraria valutando la risposta monolitica degli stessi. Prima di tutto occorre riconoscere le condizioni che predispongono l'attivazione di meccanismi locali di danno e di collasso e di conseguenza l'individuazione della necessità di effettuare analisi cinematiche puntuali, in sostituzione o in integrazione di analisi della risposta globale del sistema.

Naturalmente, la definizione dei macroelementi e dei meccanismi di collasso significativi per gli edifici parte dall'individuazione di eventuali presenze di stati di danneggiamento o di sconessioni pregresse che possono essersi formate nella compagine muraria a causa delle azioni sismiche e che segnalano macroelementi suscettibili di instabilità.⁶³

Villa Diomede, come molte strutture storiche in muratura, non presenta elementi di collegamento orizzontale tra le pareti e questo comporta una elevata vulnerabilità nei riguardi dei meccanismi locali che può tradursi in un collasso fuori piano di singoli pannelli murari o di più ampie porzioni di edificio.

Le due principali modalità di collasso considerate sono:

- Ribaltamento del muro fuori piano: nel caso in cui l'azione sismica investa una parete in direzione ortogonale al suo piano. La risposta dipende dalla presenza o meno di connessioni tra le pareti ortogonali e dall'ancoraggio dei solai.
- Rottura nel piano del muro: nel caso in cui l'azione sismica solleciti la parete in direzione complanare al piano dello stesso muro. Questo meccanismo comporta la formazione di lesioni inclinate sulla parete che la percorrono interamente.

Le verifiche locali sono state condotte prevalentemente tramite l'impostazione dei ribaltamenti fuori piano

⁶² cfr. §C8.7.1.1 della Circolare

⁶³ L. Milano, A. Mannella, C. Morisi, A. Martinelli (a cura di), *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in murature e dei relativi modelli cinematici di analisi.*

delle pareti libere principali, essendo questi i meccanismi più frequenti.

Nei prossimi capitoli si tratterà della verifica dei meccanismi dei macroelementi identificati a Villa Diomede, la valutazione dell'azione sismica, la descrizione dei meccanismi analizzati e infine l'identificazione dei macroelementi e le relative verifiche.⁶⁴

4.2 Caratteristiche meccaniche e analisi dei carichi

4.2.1 Caratteristiche meccaniche

Le ricerche e gli studi effettuati sulla Villa, come ampiamente discusso nei capitoli precedenti, indicano una muratura poco compatta ed eterogenea e definiscono la scarsa qualità del materiale che le costituisce. Considerata l'impossibilità di effettuare prove di tipo distruttivo da cui si evincerebbero delle caratteristiche meccaniche più precise, si è scelto di considerare i valori meccanici forniti dalla letteratura riassunti in Tab.4.1, riferiti alla Tab. C8A.2.1 della Circolare.

Nel caso delle murature storiche, i valori indicati in Tab.4.1 sono da riferirsi a condizioni di muratura con malta di scadenti caratteristiche, giunti non particolarmente sottili ed in assenza di ricorsi o listature che, con passo costante, regolarizzino la tessitura ed in particolare l'orizzontalità dei corsi. Inoltre si assume che, per le murature storiche, queste siano a paramenti scollegati, ovvero manchino sistematici elementi di connessione trasversale (o di ammortamento per ingranamento tra i paramenti murari).

Un'altra assunzione riguardante la Tab.4.1 è che le diverse tipologie di muratura siano costituite da due paramenti accostati, o con un nucleo interno di limitato spessore (inferiore allo spessore del paramento). Nel caso in cui il nucleo interno sia ampio rispetto ai paramenti o particolarmente scadente, è necessario ridurre opportunamente i parametri di resistenza e deformabilità, attraverso una omogeneizzazione delle caratteristiche meccaniche nello spessore. In assenza di valutazioni più accurate è possibile penalizzare i suddetti parametri meccanici attraverso il coefficiente indicato in Tabella 4.2.

⁶⁴Mattiello E. (2013), *Analisi di vulnerabilità sismica di palazzo donghi dell'università di padova: studio globale e verifica locale dei macroelementi*, Tesi di Laurea, Rel. Prof. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2012-2013

Tabella 4.1 – Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per le diverse tipologie di muratura, dove f_m = resistenza media a compressione della muratura, τ_0 = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w
	[N/cm ²]	[N/cm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN/m ³]
	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100	2,0	690	230	19
	180	3,2	1050	350	
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200	3,5	1020	340	20
	300	5,1	1440	480	
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260	5,6	1500	500	21
	380	7,4	1980	660	
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140	2,8	900	300	16
	240	4,2	1260	420	

Tabella 4.2 – Coefficienti correttivi dei parametri meccanici

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

Successivamente è stato determinato il livello di conoscenza LC^{65} , variabile tra 1 e 3, che esprime quanto è stata approfondita la fase di indagine dell'edificio. Questo passaggio è necessario al fine di determinare i valori dei parametri meccanici da considerare all'interno dell'intervallo definito dalla Tab.4.1.

Nel caso oggetto di studio è stato assunto un $LC1$ che corrisponde ad una conoscenza minima dell'edificio, sebbene in possesso di un rilievo geometrico le condizioni di degrado della muratura rendono difficili ulteriori approfondimenti e valutazioni delle caratteristiche meccaniche e degli stati di fessurazione. Seguendo le indicazioni della normativa⁶⁶, rispetto alla Tab.4.1 e Tab.4.2, sono stati considerati i valori minimi di resistenza e quelli medi per quanto riguarda i moduli elastici, applicando i coefficienti correttivi alle resistenze per la presenza di un nucleo scadente (Tab.4.3),

⁶⁵ Circolare, § C8A.1.A.4, Costruzioni in muratura: livelli di conoscenza.

⁶⁶ Circolare, § C8A.1.1, Stima dei livelli di conoscenza e dei fattori di conoscenza.

Tabella 4.3 - Caratteristiche meccaniche della muratura, considerato il livello di conoscenza LC1

Tipologia di muratura	Fm	Tau o	E	G	W
	[N/cm ²]	[N/cm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN/m ³]
	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	90	1,8	870	290	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	160	2,8	1230	410	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	208	4,48	1740	580	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	126	2,52	1080	360	16

Villa Diomede è considerato parte del patrimonio di valenza storico-artistica tutelato, quindi per la determinazione del fattore di confidenza F_C della struttura si è fatto riferimento alle Linee Guida. Il fattore di confidenza è un numero, compreso tra 1 e 1,35, che consente di graduare l'attendibilità del modello di analisi strutturale e tenerne conto nella valutazione dell'indice di sicurezza sismica (o della vita nominale).⁶⁷ Il fattore di confidenza si applica in modo diverso in funzione dei modelli per la valutazione della sicurezza sismica, che possono essere così classificati:

- modelli che considerano la deformabilità e la resistenza dei materiali e degli elementi strutturali;
- modelli che considerano l'equilibrio limite dei diversi elementi della costruzione, pensando il materiale muratura come rigido e non resistente a trazione (creazione di un cinematismo di blocchi rigidi, attraverso l'introduzione di opportune sconnessioni).

Nel primo caso il fattore di confidenza si applica in genere alle proprietà dei materiali, in particolare riducendo le resistenze. Nel secondo caso, ossia di modelli di corpo rigido, nei quali la resistenza del materiale non viene tenuta in conto, il fattore di confidenza si applica direttamente alla capacità della struttura, ovvero riducendo l'accelerazione corrispondente ai diversi stati limite.

Il fattore di confidenza in questo caso si è determinato definendo diversi fattori di confidenza parziali F_{Ck} ($k= 1,2,3,4$), sulla base dei coefficienti numerici riportati in Tab.4.4 e assegnati in base alle quattro categorie di indagine e al livello di conoscenza in esse raggiunto: rilievo geometrico (F_{C1}), identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica (F_{C2}), proprietà meccaniche dei materiali (F_{C3}), terreno e fondazioni (F_{C4}).⁶⁸

⁶⁷ Linee Guida, § 4.2, Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

⁶⁸ Tutti i livelli di approfondimento sono riportati nelle Linee Guida, § 4.2, tabella 4.1.

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{ck}$$

Le valutazioni effettuate hanno carattere locale e le informazioni sul terreno e fondazioni non hanno alcuna relazione con il meccanismo di collasso per cui il fattore di confidenza parziale F_{C4} è stato assunto pari a 0.⁶⁹

Tabella 4.4 - definizione dei livelli di approfondimento delle indagini sui diversi aspetti della conoscenza e relativi fattori parziali di confidenza.

Rilievo geometrico	rilievo geometrico completo	$F_{C1} = 0.05$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche)	$F_{C2} = 0.12$
Proprietà meccaniche dei materiali	parametri meccanici desunti da dati già disponibili	$F_{C3} = 0.12$
Terreno e fondazioni	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni	$F_{C4} = 0$

Risulta quindi:

$$F_C = 1 + 0,29 = 1,29$$

Una volta studiati i meccanismi di ribaltamento si è voluto effettuare una simulazione considerando un livello di conoscenza pari a LC2. L'aumento del livello di conoscenza porterà alla riduzione del fattore di confidenza a $F_C = 1,12$ e all'aumento delle caratteristiche meccaniche utilizzate nel calcolo dell'arretramento della cerniera come indicato in tabella 4.5.

Tabella 4.5 - Caratteristiche meccaniche della muratura, considerato il livello di conoscenza LC2

Tipologia di muratura	Fm	Tau o	E	G	W
	[N/cm ²]	[N/cm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN/m ³]
	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	140	2,6	870	290	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	250	4,3	1230	410	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	320	6,5	1740	580	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	190	3,5	1080	360	16

⁶⁹ Linee Guida § 4.2 – Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

4.2.2 Valutazione dei carichi sismici

Il principio su cui si basano i criteri generali di sicurezza sono gli stati limite, definiti come la condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali l'opera è stata progettata⁷⁰ e sono suddivisi in stati limiti di esercizio (SLE) e stati limiti ultimi (SLU).

Come riporta il §3.2.1 delle NTC, gli stati limite di esercizio sono:

- Stato Limite di Operatività (SLO), a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;
- Stato Limite di Danno (SLD), a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

Gli stati limite ultimi sono:

- Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV), a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC), a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.⁷¹

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile e si definisce collasso.

Le verifiche riportate nei paragrafi successivi riguardanti l'analisi dei macroelementi sono state condotte nei confronti degli SLV. Infatti, secondo le indicazioni del §2.1 delle NTC per le opere esistenti è possibile fare riferimento a livelli di sicurezza diversi da quelli delle nuove opere ed è anche possibile considerare solo gli stati limite ultimi. Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate in Tab.4.6.

⁷⁰ N.T.C. 2008, § 2.1, Sicurezza e prestazioni attese – principi fondamentali

⁷¹ N.T.C. 2008, § 3.2.1, Stati limite e relative probabilità di superamento

Tabella 4.6 - Probabilità di superamento PVR al variare degli stati limite.

Stati limite		P_{VR} probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio SLE	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi SLU	SLV	10%
	SLC	5%

I dati sismici a cui è stato fatto riferimento sono stati elaborati con il programma Excel "Spettri-NTC" fornito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e in grado di fornire gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticali) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale.

La definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in tre fasi, ciascuna delle quali prevede la scelta di alcuni parametri da parte dell'utente.⁷²

La prima fase corrisponde all'individuazione della pericolosità del sito che nel caso in esame è stata effettuata per comune, ma può avvenire anche per coordinate (fig.4.1).

Figura 4.1 - Interfaccia del programma Spettri NTC, prima fase

Nella seconda fase (fig.4.2) deve essere fatta la scelta della strategia di progettazione attraverso l'individuazione di alcuni parametri significativi della struttura quali la vita nominale V_N e la classe d'uso dell'opera strutturale che permettono l'individuazione dei valori di progetto per la valutazione della sicurezza sismica. La vita nominale è il numero di anni durante i quali la struttura deve poter essere utilizzata con le

⁷² Spettri di risposta NTC ver. 1.0.3

funzioni alle quali è stata destinata. I valori della vita nominale delle varie tipologie di opere sono definiti secondo la normativa⁷³, e sono qui riportati in Tabella 4.7; per Villa Diomede si è scelto il valore di V_N pari a 50.



Figura 4.2 - Interfaccia del programma Spettri NTC, seconda fase

Tabella 4.7 - Vita nominale V_N per i diversi tipi di opere.

Tipi di costruzioni	Vita Nominale V_N (in anni)
Opere provvisorie- Opere provvisionali – Strutture in fase costruttiva	≤ 10
Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grande dimensione o importanza	≥ 100

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso definite al § 2.4.2 delle NTC 2008 e per Villa Diomede si è adottata la classe II in cui rientrano le “costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali” con un coefficiente $C_U=1,0$.⁷⁴

La determinazione della vita nominale V_N e la classe d'uso con il rispettivo coefficiente sono fondamentali per ricavarsi il periodo di riferimento dell'azione sismica V_R tramite la formula indicata al §2.4.3 delle NTC:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 50$$

⁷³ NTC 2008, §2.4.1, Vita nominale, classe d'uso e periodo di riferimento - Vita nominale, tabella 2.4.I.

⁷⁴ NTC 2008, §2.4.1

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione. Essa costituisce l'elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A quale definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $Se(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , come definite nel §3.2.1, nel periodo di riferimento V_R , come definito nel §2.4.⁷⁵

Ai fini delle NTC le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

In relazione al periodo di riferimento proprio della struttura, e in base allo stato limite considerato, cui è associata una P_{VR} in percentuale nel periodo di riferimento, viene valutato il periodo di ritorno di riferimento dell'azione sismica T_R :

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Nelle analisi si è supposta una categoria di sottosuolo C e una condizione topografica T1 corrispondente a pendii con inclinazione media $i \leq 15^\circ$.

I valori che si ottengono sono riportati in Tab.4.8, assieme agli altri parametri sismici ricavati dal programma come il diagramma dello spettro di risposta elastica risultante di fig.4.3.

Nell'ultima fase quindi è stata determinata l'azione di progetto allo SLV e i parametri dello spettro di risposta orizzontale (fig.4.4). I dati utilizzati per le analisi esposte nei prossimi capitoli sono riassunte in Tab.4.9.

Tabella 4.8 - Valori dei parametri a_g , F_0 , T_C^* per i periodi di ritorno T_R associati a ciascun Stato Limite. In evidenza quello utilizzato

Stato limite	T_R [anni]	a_g [g]	F_0	T_C^* [s]
SLO	30	0,041	2,381	0,284
SLD	50	0,053	2,350	0,320
SLV	475	0,133	2,464	0,369
SLC	975	0,168	2,497	0,380

⁷⁵ NTC 2008, §3.2, azione sismica

Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

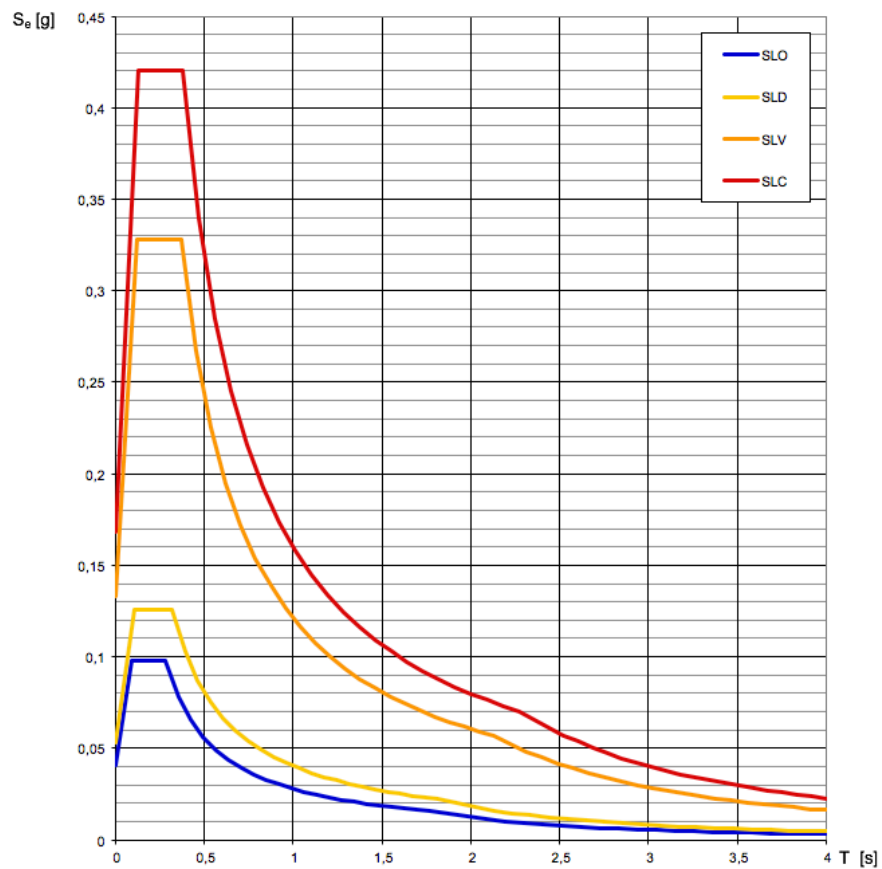


Figura 4.3 – Spettri di risposta elastici per i diversi Stati Limite

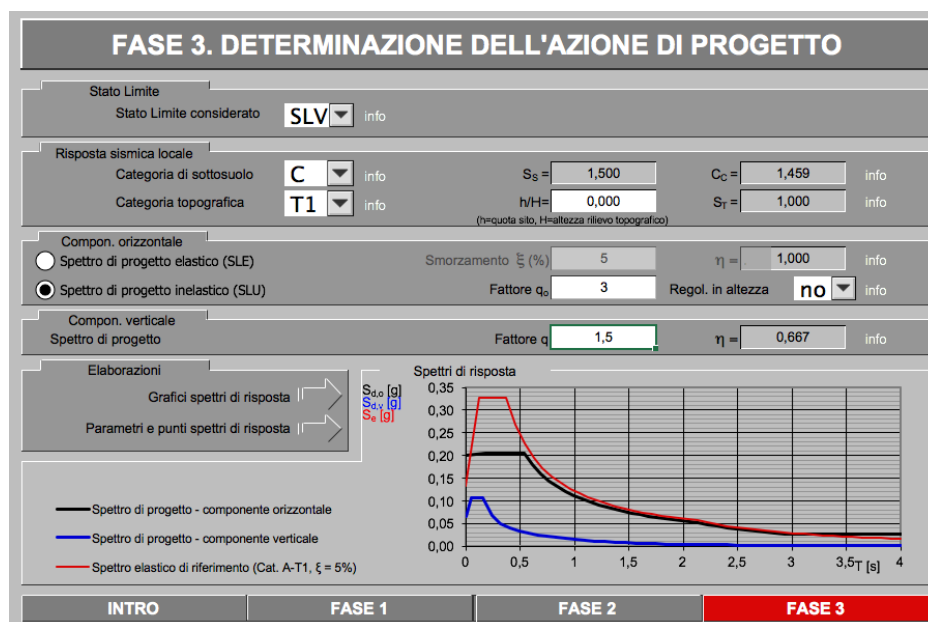


Figura 4.4 - Interfaccia del programma Spettri NTC, terza fase

Tabella 4.9 - Dati sismici utilizzati

Stato limite di riferimento	SLV	
Coordinate geografiche Pompei	Longitudine: 14,4982	
	Latitudine: 40,7471	
Altitudine	14 m s.l.m	
Vita nominale	V_N	50
Classe d'uso e relativo coefficiente	C_U	1
Periodo di riferimento dell'azione sismica	V_R	50
Probabilità di superamento dello Stato Limite	P_{VR}	10%
Tempo di ritorno dell'azione sismica	T_R	475
Categoria sottosuolo	C	
PARAMETRI INDIPENDENTI		
Accelerazione massima orizzontale al sito	a_g	0,133 g
Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale	F_0	2,464
Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale	T_C^*	0,369 s
Coefficiente di amplificazione stratigrafica	S_S	1,5
	C_C	1,459
Coefficiente di amplificazione topografica	S_T	1
Fattore di struttura	q	2,4
PARAMETRI DIPENDENTI		
Coefficiente tenente conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche	S	1,5
	η	0,417
Periodo corrispondente all'inizio dello spettro ad accelerazione costante	T_B	0,180 s
Periodo corrispondente all'inizio dello spettro a velocità costante	T_C	0,539 s
Periodo corrispondente all'inizio dello spettro a spostamento costante	T_D	2,132 s

4.3 Modellazione locale – Analisi per macroelementi

4.3.1 Schemi generali di calcolo dei meccanismi di collasso

Lo studio del comportamento di un edificio esistente in muratura sotto azione sismica deve considerare l'eventualità di scarsa efficacia delle connessioni tra gli elementi strutturali. Se nella verifica di una costruzione moderna l'azione preliminare è la definizione della classe di resistenza dei materiali impiegati, nella verifica della struttura muraria storica è preliminare il giudizio di qualità delle parti della costruzione che non è riconducibile alla misura di parametri dimensionali da immettere in un procedimento di analisi consolidato. Salvo rari casi, infatti, la condizione di crisi della costruzione muraria si raggiunge non per il superamento della resistenza dei materiali ma con la perdita della condizione di equilibrio e l'innescò di un meccanismo di collasso. Il suo comportamento dipende in misura determinante dalla qualità di alcuni dettagli costruttivi e, soprattutto, da fatti intervenuti nel processo di evoluzione e trasformazione subito nel corso degli anni. I rilievi critici del fabbricato con le caratteristiche dimensionali, il tipo e la qualità dei materiali e dei collegamenti che compongono Villa Diomede sono di fondamentale supporto per lo studio dei meccanismi di collasso.

I meccanismi su cui si è concentrata maggiormente l'analisi sono quelli di primo modo, ovvero quelli fuori piano, generalmente più gravosi rispetto a quelli che si manifestano nel piano, in quanto il pannello murario è dotato di scarsa resistenza alle azioni perpendicolari al proprio piano, e quindi al ribaltamento. Gli elementi che contribuiscono maggiormente alla determinazione della risposta strutturale sono naturalmente legati alle dimensioni, alla natura e alle caratteristiche della muratura.

I meccanismi di collasso ritenuto più significativo e probabile è quello di ribaltamento e sarà analizzato secondo quanto riportato nelle "Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi cinematismi di analisi".⁷⁶

Il parametro più significativo da individuare in ciascun meccanismo è il coefficiente di collasso " α " (che viene espresso come rapporto tra l'accelerazione critica su quella gravitazionale). Tale valore rappresenta il moltiplicatore critico delle masse sismiche per il quale l'elemento considerato va in crisi, corrispondente al raggiungimento delle condizioni limite di equilibrio alla rotazione dell'elemento murario attorno a cerniere cilindriche, oppure al raggiungimento delle tensioni ultime di resistenza a compressione o a trazione della sezione muraria studiata.

Vengono riportati i simboli utilizzati nell'analisi dei macroelementi, unitamente all'indicazione del loro significato:

⁷⁶ L. Milano, A. Mannella, C. Morisi, A. Martinelli (a cura di), *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*.

- α è il moltiplicatore orizzontale dei carichi agenti sui macroelementi;
- P_i è il peso proprio della parete o del macroelemento individuato;
- N_i è il carico agente sulla parete;
- N_{10i} è la componente orizzontale della spinta di archi o volte sulla parete i-esima;
- d_i è il braccio orizzontale del carico verticale trasmesso alla parete;
- T_i è lo sforzo del tirante al piano i-esimo;
- s_i è lo spessore della parete al piano i-esimo;
- h_i è il braccio verticale dell'azione trasmessa da eventuali orizzontamenti oppure è l'altezza del macroelemento;
- X_{Gi} è la componente in x del baricentro della i-esima parete;
- Y_{Gi} è la componente in y del baricentro della i-esima parete;
- t è l'arretramento della cerniera cilindrica;
- l è la lunghezza/profondità della parete.

Adottando in maniera sistematica questo tipo di analisi, effettuando uno studio accurato e ricercando l'elemento che può compromettere la resistenza dell'edificio, si eseguirà di fatto una valutazione degli elementi più vulnerabili del fabbricato.

Il meccanismo di collasso sfruttato per l'analisi è quello del ribaltamento della parete semplice (fig4.5).

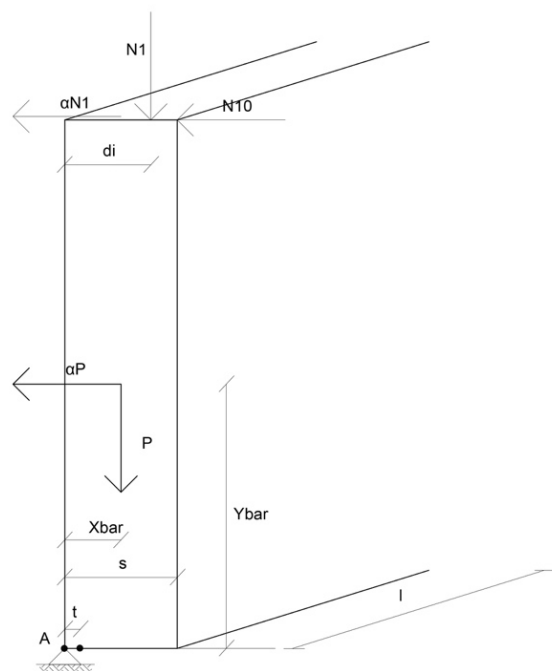
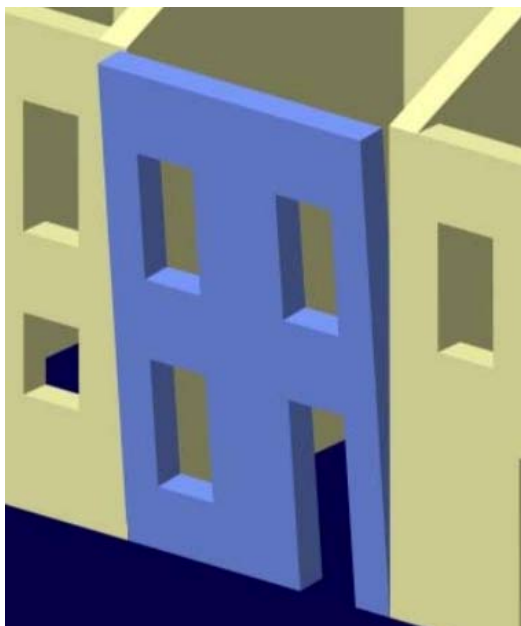


Figura 4.5 - Meccanismi di collasso locale, ribaltamento della parete e relativo modello cinematico di analisi. [Reluis]

Questo meccanismo consiste nella rotazione rigida di intere facciate o di porzioni di pareti attorno a cerniere cilindriche in prevalenza orizzontali poste alla base della struttura muraria, in concomitanza ad una sollecitazione sismica ortogonale.

Per individuare il coefficiente di collasso che attiva il meccanismo è sufficiente determinare il valore del rapporto tra il momento stabilizzante dovuto alla sommatoria dei pesi della muratura, dei carichi verticali (presi entrambi positivamente) e delle spinte orizzontali (prese negativamente) agenti sulla stessa e il momento ribaltante, ottenuto tenendo conto dell'azione sismica.

Villa Diomede è priva di orizzontamenti per cui i setti e le porzioni murarie studiate sono interessate unicamente dalla forza peso e si trascurano eventuali sovraccarichi e spinte nel calcolo del coefficiente di attivazione del meccanismo. Il coefficiente di attivazione del meccanismo si ottiene quindi dal rapporto tra momento stabilizzante e ribaltante:

$$\alpha = \frac{M_S}{M_R}$$

$$\text{dove } M_S = P_1 \cdot \left(\frac{s}{2} - t\right) \text{ e } M_R = \alpha P_1 \cdot Y_{bar}$$

Nell'utilizzo di questo meccanismo, il muro è schematizzato come corpo rigido che ruota attorno ad una cerniera posta alla base e posizionata a filo dello spigolo più esterno della sezione della parete. Seguendo questa semplificazione si genera una concentrazione di tensioni nel punto di contatto in cui si articola il meccanismo: per tenere conto di questo fattore nella modellazione si procederà arretrando la posizione delle cerniere cilindriche, al fine di considerare l'effetto di schiacciamento della muratura. La differenza tra queste due rette parallele viene convenzionalmente identificata dal simbolo "t".

Nella determinazione numerica del valore dell'arretramento si considera che l'innescio del cinematismo si manifesti non appena la tensione massima al lembo compresso raggiunga il valore di resistenza caratteristica a compressione della muratura σ_r , definita come:

$$\sigma_r = \frac{f_m}{FC \cdot \gamma_s}$$

dove f_m è il valore della resistenza a compressione ricavato dalla tab.4.3, FC è il fattore di confidenza della struttura ricavato dalla tab.4.4; γ è il coefficiente parziale di sicurezza pari a 2.⁷⁷

Il valore della tensione massima viene calcolato considerando la muratura completamente non reagente a trazione ed ipotizzando una distribuzione lineare delle tensioni di compressione al contatto. Questa ipotesi è a favore di sicurezza poiché considera implicitamente un comportamento di materiale fragile per

⁷⁷ N.T.C 2008, § 7.8.1.1, **Costruzioni in muratura.**

la muratura. Ipotizzando che il polo di rotazione sia nel baricentro delle tensioni di compressione, aventi distribuzione triangolare, possiamo calcolare l'effettivo valore di "t" nel modo seguente. Si impone che la tensione agente in corrispondenza del lembo compresso σ_r sia pari alla resistenza a compressione della muratura. La tensione media di compressione σ_m sarà data quindi dal rapporto tra lo sforzo normale N agente sulla sezione e l'area della sezione reagente (considerata per l'intera lunghezza della parete "l"), ottenendo:

$$\sigma_m = \frac{N}{3 \cdot t \cdot l}$$

Occorre poi far coincidere la tensione al lembo esterno della muratura con la massima che sarà data dalla formula:

$$\sigma_{\max} = \sigma_r = 2 \cdot \sigma_m = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot t \cdot l}$$

In questo modo, il valore dell'arretramento della cerniera "t" risulta semplicemente:

$$t = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot \sigma_r \cdot l}$$

4.3.2 Approccio cinematico

L'approccio cinematico sfruttato per l'analisi dei meccanismi locali di Villa Diomede segue le indicazioni riportate nella Circolare, con particolare riferimento al capitolo C8A.4 in cui viene espresso il concetto di collasso parziale per cause sismiche che spesso avviene negli edifici esistenti in muratura, in genere per perdita dell'equilibrio di porzioni murarie. Le verifiche con riferimento ai meccanismi locali di danno e collasso (nel piano e fuori piano) possono essere svolte tramite l'analisi limite dell'equilibrio, secondo l'approccio cinematico, che si basa sulla scelta del meccanismo di collasso e la valutazione dell'azione orizzontale che attiva tale cinematisimo.

Generalmente, per l'applicazione del metodo di analisi si ipotizza che la resistenza a trazione della muratura sia nulla, sia assente lo scorrimento tra i blocchi e che la resistenza a compressione della muratura sia infinita. Tuttavia, per una simulazione più realistica del comportamento, è opportuno far uso di una serie di accorgimenti che tengano conto, in forma approssimata, della presenza dell'attrito che investe il contatto tra i blocchi, le connessioni tra le pareti murarie, la presenza di catene metalliche e la limitata resistenza a compressione della muratura, che come precedentemente esposto al paragrafo precedente, considera le cerniere adeguatamente arretrate rispetto allo spigolo della sezione.

L'approccio cinematico permette quindi di determinare l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo. Tale curva è espressa attraverso

un moltiplicatore α , rapporto tra le forze orizzontali applicate ed i corrispondenti pesi delle masse presenti, rappresentato in funzione dello spostamento d_k di un punto di riferimento del sistema; la curva deve essere determinata fino all'annullamento di ogni capacità di sopportare azioni orizzontali ovvero al raggiungimento del valore nullo di α . Tale curva può essere trasformata nella curva di capacità di un sistema equivalente ad un grado di libertà, nella quale può essere definita la capacità di spostamento ultimo del meccanismo locale, da confrontare con la domanda di spostamento richiesta dall'azione sismica.

Per ogni possibile meccanismo locale ritenuto significativo per l'edificio, il metodo si articola nei seguenti passi:

- trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile (catena cinematica), attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti da piani di frattura ipotizzabili per la scarsa resistenza a trazione della muratura, in grado di ruotare o scorrere tra loro (meccanismo di danno e collasso);
- valutazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi α_0 che comporta l'attivazione del meccanismo (stato limite di danno);
- valutazione dell'evoluzione del moltiplicatore orizzontale dei carichi al crescere dello spostamento d_k di un punto di controllo della catena cinematica, usualmente scelto in prossimità del baricentro delle masse, fino all'annullamento della forza sismica orizzontale;
- trasformazione della curva così ottenuta in curva di capacità, ovvero in accelerazione a^* e spostamento d^* spettrali, con valutazione dello spostamento ultimo per collasso del meccanismo (stato limite ultimo), definito in seguito;
- verifiche di sicurezza, attraverso il controllo della compatibilità degli spostamenti e/o delle resistenze richieste alla struttura.⁷⁸

4.3.3 Analisi cinematica lineare

L'analisi cinematica lineare permette la determinazione del moltiplicatore orizzontale dei carichi α_0 mediante l'applicazione ai blocchi rigidi della catena cinematica delle seguenti forze:

- Pesi propri dei blocchi, applicati nel loro baricentro;
- Carichi verticali portati dagli stessi (pesi propri e sovraccarichi dei solai e della copertura, o altri elementi murari non considerati nel modello strutturale);
- Sistema di forze orizzontali proporzionali ai carichi verticali portati, se queste non sono efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;
- Eventuali forze esterne (es. forze trasmesse da catene);
- Eventuali forze interne.

⁷⁸ Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, cap. C8A.4, analisi dei meccanismi di collasso in edifici esistenti in muratura

Assegnata una rotazione virtuale θ_k al generico blocco k , è possibile determinare in funzione di questa e della geometria della struttura, gli spostamenti delle diverse forze applicate nella rispettiva direzione. Il moltiplicatore α_0 si ottiene applicando il Principio dei Lavori Virtuali, in termini di spostamenti, uguagliando il lavoro totale eseguito dalle forze esterne ed interne applicate al sistema in corrispondenza dell'atto di moto virtuale:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \cdot \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \cdot \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \cdot \delta_h = L_{fi}$$

dove:

- n è il numero di tutte le forze peso applicate ai diversi blocchi della catena cinematica;
- m è il numero di forze peso non direttamente gravanti sui blocchi le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmesse ad altre parti dell'edificio;
 - o è il numero di forze esterne, non associate a masse, applicate ai diversi blocchi;
- P_i è la generica forza peso applicata (peso proprio del blocco, applicato nel suo baricentro, o un altro peso portato);
- P_j è la generica forza peso, non direttamente applicata sui blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio;
- x_i è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
- x_j è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' j -esimo peso P_j , assumendo come verso positivo quello associato alla direzione secondo cui agisce l'azione sismica che attiva il meccanismo;
- y_i è lo spostamento virtuale verticale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i , assunto positivo se verso l'alto;
- F_h è la generica forza esterna (in valore assoluto), applicata ad un blocco;
- h è lo spostamento virtuale del punto dove è applicata la h -esima forza esterna, nella direzione della stessa, di segno positivo se con verso discorde;
- L_{fi} è il lavoro di eventuali forze interne.

4.3.4 Analisi cinematica non lineare

Al fine di conoscere la capacità di spostamento della struttura fino al collasso attraverso il meccanismo considerato, il moltiplicatore orizzontale dei carichi può essere valutato non solo sulla configurazione iniziale, ma anche su configurazioni variate della catena cinematica, rappresentative dell'evoluzione del meccanismo e descritte dallo spostamento d_k di un punto di controllo del sistema. L'analisi deve essere condotta fino al raggiungimento della configurazione cui corrisponde l'annullamento del moltiplicatore α , in corrispondenza dello spostamento $d_{k,0}$.

Se le diverse azioni (forze peso, azioni esterne o interne) vengono mantenute costanti all'evolversi del cinematismo, la curva che si ottiene è pressoché lineare; in tal caso, in via semplificata, è richiesta la sola valutazione dello spostamento $d_{k,0}$ per cui si ha l'annullamento del moltiplicatore, e la curva assume la seguente espressione:

$$\alpha = \alpha_0 \left(\frac{1 - d_k}{d_{k,0}} \right)$$

Tale configurazione può essere ottenuta esprimendo la geometria in una generica configurazione variata, funzione della rotazione finita $\theta_{k,0}$, applicando il Principio dei Lavori Virtuali e avendo posto $\alpha=0$, e ricavando da tale equazione, in genere non lineare, l'incognita $\theta_{k,0}$.

Curva di capacità: §C8A4.2.2 della circolare

La curva di capacità dell'oscillatore equivalente, relazione tra l'accelerazione a^* e lo spostamento d^* può ora essere definita in quanto è noto l'andamento del moltiplicatore orizzontale dei carichi α in funzione dello spostamento d_k del punto di controllo della struttura.

La massa partecipante al cinematismo M^* può essere valutata considerando gli spostamenti virtuali dei punti di applicazione dei diversi pesi, associati al cinematismo, come una forma modale di vibrazione:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{xi})^2}{g \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i}^2}$$

dove:

- $n+m$ è il numero delle forze peso P_i applicate le cui masse, per effetto dell'azione sismica, generano forze orizzontali sugli elementi della catena cinematica;
- $\delta_{x,i}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto di applicazione dell' i -esimo peso P_i .

L'accelerazione sismica spettrale a^* si ottiene moltiplicando per l'accelerazione di gravità il moltiplicatore α e dividendolo per la frazione di massa partecipante al cinematismo. L'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo vale quindi:

$$a^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* \cdot F_C} = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* \cdot F_C}$$

dove:

- g è l'accelerazione di gravità;
- $e^* = \frac{g \cdot M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i}$ è la frazione di massa partecipante della struttura;
- F_C è il fattore di confidenza precedentemente valutato.

Lo spostamento spettrale d^* dell'oscillatore equivalente può essere ottenuto come spostamento medio dei diversi punti nei quali sono applicati i pesi P_i , pesato sugli stessi. In via approssimata, noto lo spostamento del punto di controllo d_k è possibile definire lo spostamento spettrale equivalente con riferimento agli spostamenti virtuali valutati sulla configurazione iniziale:

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}}$$

dove n , m , P_i , $\delta_{x,i}$ sono definiti come sopra e $\delta_{x,k}$ è lo spostamento virtuale orizzontale del punto k , assunto come riferimento per la determinazione dello spostamento d_k .

Nel caso in cui la curva presenti un andamento lineare (C8A.4.2), fatto che si verifica quando le diverse azioni vengono mantenute costanti, la curva di capacità assume la seguente espressione:

$$a^* = a_0^* \left(1 - \frac{d^*}{d_0^*} \right)$$

dove: d_0^* è lo spostamento spettrale equivalente corrispondente allo spostamento $d_{k,0}$.

Si usano dei punti diversi sulla curva di capacità per la valutazione della resistenza e della capacità di spostamento relative allo Stato limite di danno (SLD) e allo Stato limite di salvaguardia della vita (SLV). Per lo SLD si considera l'accelerazione spettrale a_0^* corrispondente all'attivazione del meccanismo di danno. Per lo SLV si considera lo spostamento spettrale d_u^* , corrispondente al minore fra gli spostamenti così definiti: il 40% dello spostamento per cui si annulla l'accelerazione spettrale a^* valutata su una curva in cui si considerino solamente le azioni di cui è verificata la presenza fino al collasso, e lo spostamento corrispondente a situazioni localmente incompatibili con la stabilità degli elementi della costruzione (ad esempio, sfilamento di travi), nei casi in cui questo sia valutabile.

4.3.5 Verifiche di sicurezza

Stato Limite di Danno

La verifica di sicurezza nei confronti dello Stato limite di danno è soddisfatta qualora l'accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo sia superiore all'accelerazione di picco della domanda sismica.

Nel caso in cui la verifica riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra, l'accelerazione di attivazione del meccanismo viene confrontata con l'accelerazione al suolo, ovvero lo spettro elastico definito nel § 3.2.6, valutato per $T=0$:

$$a_0^* \geq a_g(P_{VR}) \cdot S$$

dove:

- a_g è funzione della probabilità di superamento dello stato limite scelto e della vita di riferimento come definiti al § 3.2 delle NTC;
- S è definito al § 3.2.3.2.1 delle NTC.

Se invece il meccanismo locale interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, si deve tener conto del fatto che l'accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematisimo è in genere amplificata rispetto a quella al suolo. In aggiunta alla precedente equazione, si verifica anche che:

$$a_0^* \geq S_e(T_1)\psi(Z)\gamma$$

dove:

- $S_e(T_1)$ è lo spettro elastico definito nel § 3.2.3.2.1 delle NTC, funzione della probabilità di superamento dello stato limite scelto (in questo caso 63%) e del periodo di riferimento V_R come definiti al § 3.2. delle NTC, calcolato per il periodo T_1 ;
- T_1 è il primo periodo di vibrazione dell'intera struttura nella direzione considerata;
- $\psi(Z)$ è il primo modo di vibrazione nella direzione considerata, normalizzato ad uno in sommità all'edificio; in assenza di valutazioni più accurate può essere assunto $\psi(Z)=Z/H$, dove H è l'altezza della struttura rispetto alla fondazione;
- Z è l'altezza, rispetto alla fondazione dell'edificio, del baricentro delle linee di vincolo tra i blocchi interessati dal meccanismo ed il resto della struttura;
- γ è il corrispondente coefficiente di partecipazione modale (in assenza di valutazioni più accurate può essere assunto $\gamma=3N/(2N+1)$, con N numero di piani dell'edificio).

Nel caso di meccanismi locali, lo stato limite Stato limite di danno corrisponde all'insorgere di fessurazioni che non interessano l'intera struttura ma solo una sua parte; pertanto nel caso di edifici esistenti in

muratura, anche in considerazione delle giustificate esigenze di conservazione, pur essendo auspicabile il soddisfacimento di questo stato limite, la sua verifica non è richiesta.

Stato Limite di salvaguardia della Vita

Questo tipo di verifica può essere condotta secondo due modalità: l'analisi cinematica lineare o quella non lineare.

Verifica semplificata con fattore di struttura q (analisi cinematica lineare)

Nel caso in cui la verifica riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra, la verifica di sicurezza nei confronti dello Stato limite di salvaguardia della vita è soddisfatta se l'accelerazione spettrale a_0^* che attiva il meccanismo soddisfa la seguente disuguaglianza di cui il fattore q può essere assunto uguale a 2:

$$a_0^* \geq \frac{a_g(P_{VR}) \cdot S}{q}$$

Se invece il meccanismo locale interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, si deve tener conto del fatto che l'accelerazione assoluta alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematisimo è in genere amplificata rispetto a quella al suolo. Una approssimazione accettabile consiste nel verificare, oltre alla precedente equazione, anche la:

$$a_0^* \geq \frac{S_e(T_1)\psi(Z)\gamma}{q}$$

di cui i termini sono stati precedentemente descritti e tenendo conto che lo spettro di risposta è riferito alla probabilità di superamento del 10% nel periodo di riferimento V_R .

Verifica mediante spettro di capacità (analisi cinematica non lineare)

La verifica di sicurezza dei meccanismi locali nei confronti dello Stato limite di salvaguardia della vita consiste nel confronto tra la capacità di spostamento ultimo d_u^* del meccanismo locale e la domanda di spostamento ottenuta dallo spettro di spostamento in corrispondenza del periodo secante T_s . Definito lo spostamento $d_s^* = 0.4d_u^*$ ed individuata sulla curva di capacità l'accelerazione a_s^* , corrispondente allo spostamento d_s^* , il periodo secante è calcolato come:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{d_s^*}{a_s^*}}$$

La domanda di spostamento $\Delta_d(T_s)$ sarà così ottenuta:

- nel caso in cui la verifica riguardi un elemento isolato o una porzione della costruzione comunque sostanzialmente appoggiata a terra, la verifica di sicurezza nei confronti dello Stato limite di salvaguardia della vita si considera soddisfatta se:

$$d_u^* \geq S_{De}(T_s)$$

dove S_{De} è lo spettro di risposta elastico in spostamento, definito al § 3.2.3.2.2 delle NTC.

- se invece il meccanismo locale interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, deve essere considerato lo spettro di risposta in spostamento del moto alla quota della porzione di edificio interessata dal cinematismo. Una approssimazione accettabile consiste nel verificare, anche la:

$$d_u^* \geq S_{De}(T_1) \cdot \psi(Z) \cdot \gamma \frac{\left(\frac{T_s}{T_1}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{T_s}{T_1}\right)^2 + 0.02 \frac{T_s}{T_1}}}$$

4.4 Individuazione dei macroelementi

I macroelementi sono porzioni più o meno estese dell'edificio murario che, nel caso di una struttura con adeguata qualità muraria, hanno un comportamento monolitico. La loro definizione si può compiere attraverso l'individuazione di eventuali stati di danneggiamento;

Villa Diomede non presenta elementi di collegamento tra le pareti al livello degli orizzontamenti e questo comporta una vulnerabilità nei riguardi dei meccanismi locali che possono provocare il collasso fuori dal piano di singoli pannelli murari o di più ampie porzioni dell'edificio.

Al fine di tale analisi, considerando lo stato di degrado avanzato, le numerose e distribuite fessurazioni, la mancanza di efficaci collegamenti, l'inadeguato ammassamento tra le pareti ortogonali si ritiene dunque che i cinematismi più probabili siano in questo caso i ribaltamenti fuori piano.

Nel capitolo seguente saranno riassunte le verifiche dei meccanismi locali di ribaltamento dei paramenti appartenenti alla zona sud della Villa realizzando una mappa a scala di colori. Il risultato di questa operazione è l'individuazione delle murature più a rischio suggerendo gli elementi da privilegiare per futuri interventi di messa in sicurezza da svolgersi a partire proprio dagli elementi più vulnerabili.

I macroelementi individuati sono stati numerati e analizzati secondo gli schemi prima definiti e sono rappresentati schematicamente in fig.4.6.

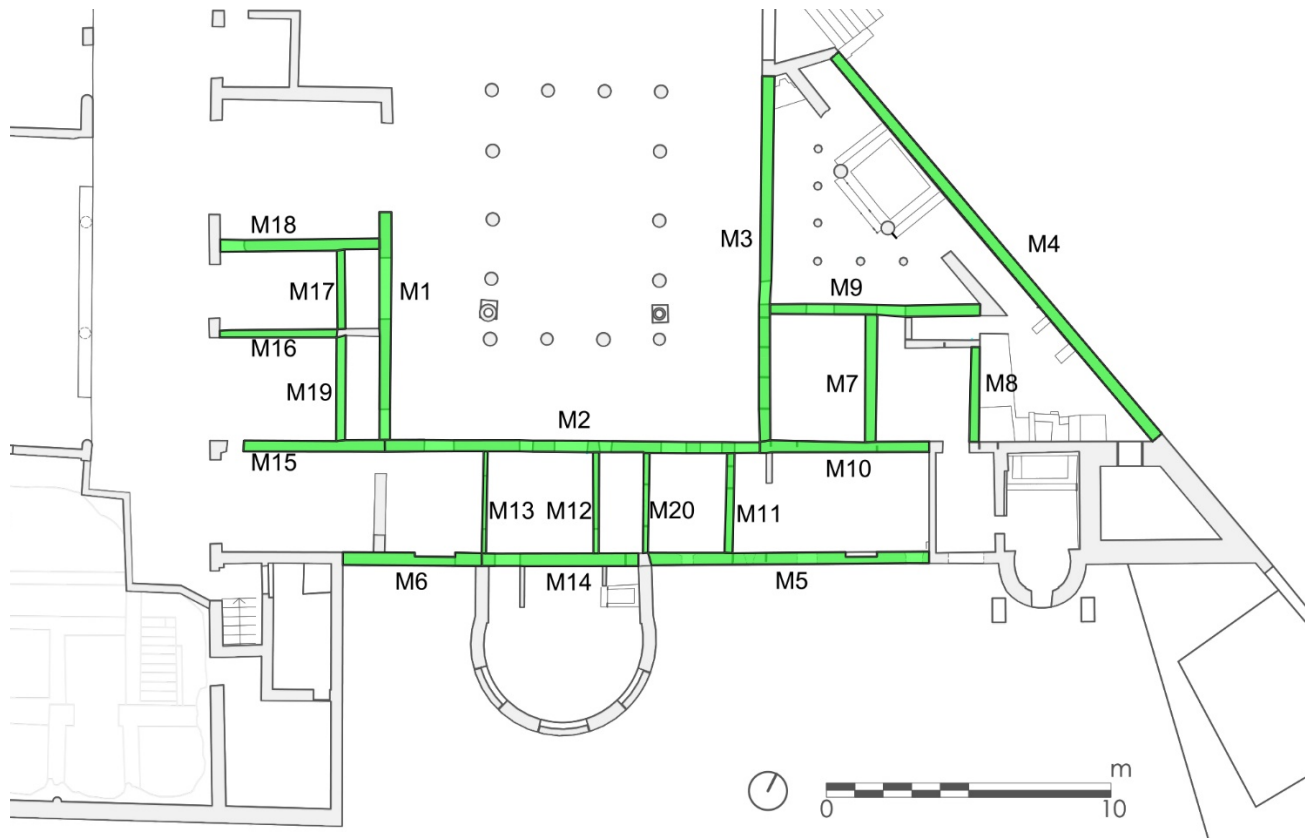
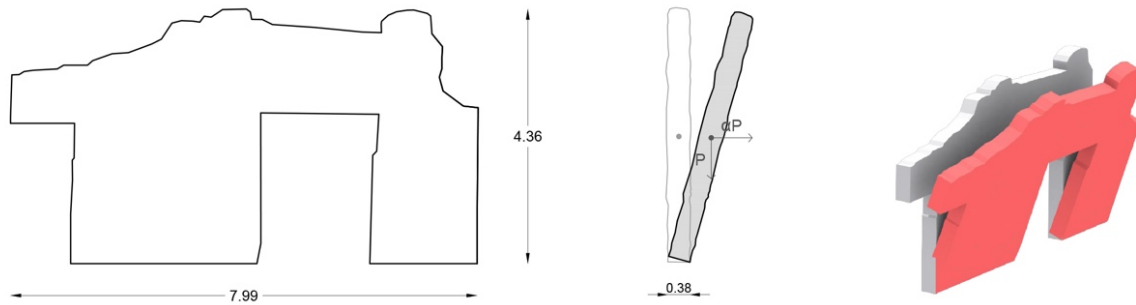


Figura 4.6 - Individuazione dei macroelementi

4.5 Verifiche dei macroelementi

Di seguito viene riportato passo per passo la procedura seguita per la determinazione del coefficiente di attivazione del meccanismo α , per la verifica lineare, e la non lineare nel caso di non soddisfacimento della lineare. Le procedure sono le medesime per ogni macroelemento per cui si riportano solo le tabelle riassuntive, salvo per M1 in cui vengono illustrati anche i passaggi che portano ai dati tabellati.

Macroelemento 1 – ribaltamento fuori piano



Per prima cosa si sono individuate le caratteristiche geometriche e meccaniche di ogni macroelemento, servendosi dei rilievi effettuati in sito e della tabella 4.3.

Per il macroelemento n°1 tali valori sono:

- lunghezza della parete, $l=7,99\text{m}$;
- altezza della parete, $h=4,36\text{m}$;
- posizione del baricentro, considerando l'origine degli assi in basso a sinistra, $X_{\text{bar}}=4,18\text{m}$ e $Y_{\text{bar}}=2,15\text{m}$;
- resistenza media a compressione della muratura, $f_m=90\text{ N/cm}^2$;
- peso specifico medio della muratura, $w=19\text{ kN/m}^3$
- spessore, $s=0,38\text{m}$.

A questo punto è stato possibile calcolare l'arretramento della cerniera per poter calcolarsi il relativo braccio stabilizzante b_s e ribaltante b_r :

$$t = \frac{2 \cdot N}{3 \cdot \sigma_r \cdot l} = 0.040 \text{ m}$$

$$b_s = \frac{s}{2} - t = 0.150 \text{ m}$$

$$b_r = Y_{\text{bar}} = 2,15 \text{ m}$$

Il coefficiente di attivazione α del meccanismo è dato dal rapporto del momento stabilizzante e ribaltante per cui diventa:

$$\alpha = \frac{M_S}{M_R} = \frac{P \cdot b_s}{P \cdot b_r} = \frac{166.42 \cdot 0.150}{166.42 \cdot 2.150} = 0.070$$

Considerando un atto di rotazione virtuale della parete attorno alla cerniera A, con rotazione θ e spostamento virtuale del baricentro della copertura come punto di spostamento di controllo unitario si possono ricavare le espressioni degli spostamenti orizzontali $\delta_{x,P}$:

$$\theta = \frac{1}{h} = 0.239 \text{ rad}$$

$$\delta_{x,P} = \theta \cdot b_r = 0.514$$

Si può ora calcolare la massa partecipante al meccanismo M^* indicando con e^* la frazione di massa partecipante al meccanismo:

$$M^* = \frac{(\sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i})^2}{g \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i \cdot \delta_{x,i}^2} = 16.96 \text{ kg}$$

$$\text{dove } e^* = \frac{g \cdot M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} = 1,00$$

L'accelerazione sismica spettrale a_0^* :

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^*} = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^*} = 0.686 \text{ m/s}^2$$

Non resta che effettuare la verifica di tipo lineare:

$$a_0^* = 0.686 \geq \frac{a_g(P_{VR}) \cdot S}{q} = 0.979 \text{ m/s}^2$$

che risulta NON soddisfatta, la capacità del sistema analizzato è circa il 70% della domanda richiesta dalla normativa.

Si deve procedere con l'analisi non lineare, determinando l'angolo θ_{k0} , a cui corrisponde lo spostamento d_{k0} del punto di controllo considerato, che caratterizza la configurazione per cui si ha l'annullamento del moltiplicatore α e quindi del momento stabilizzante M_s . θ_{k0} si ottiene ponendo uguale a zero l'equazione del momento stabilizzante:

$$M_s = \sum P_i \cdot R_i \cdot \cos(\beta_{P_i} + \theta_{k0}) = 0 \rightarrow \theta = 0.087$$

$$\text{dove } R = \sqrt{h_{bar}^2 + \left(\frac{s}{2} - t\right)^2} = 2,158m \quad \text{e } \beta = \arctg\left(\frac{h_{bar}}{\frac{s}{2} - t}\right) = 1,484$$

E' quindi possibile determinare ora il corrispondente spostamento $d_{k,0}$:

$$d_{k,0} = h_{bar} \cdot \sin \theta_{k,0} = 0.187m$$

Lo spostamento spettrale d_0^* dell'oscillatore equivalente ad 1 g.d.l. è dato da:

$$d^* = d_k \frac{\sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2}{\delta_{x,k} \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}} = 0.187m$$

o spostamento ultimo d_u^* risulta essere:

$$d_u^* = 0,40d_0^* = 0.075m$$

e lo spostamento spettrale valutato in corrispondenza del periodo secante T_s è:

$$d_s^* = 0,40d_u^* = 0.030m$$

L'accelerazione corrispondente è:

$$a^* = a_0^* \left(1 - \frac{d^*}{d_0^*}\right) = 0.720 m/s^2$$

Il periodo secante vale:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{d_s^*}{a_s^*}} = 1,28$$

La verifica di sicurezza sarà soddisfatta se lo spostamento richiesto alla struttura in presenza di evento sismico risulta minore della capacità di spostamento ultimo d_u^* , e quindi:

$$d_u^* = 0,075m \geq S_{De}(T_s) = 0,084m$$

Per questo macroelemento l'analisi non lineare risulta non soddisfatta, la capacità del sistema analizzato è circa il 71% della domanda di spostamento richiesta dalla normativa.

Riassumendo i dati in una tabella:

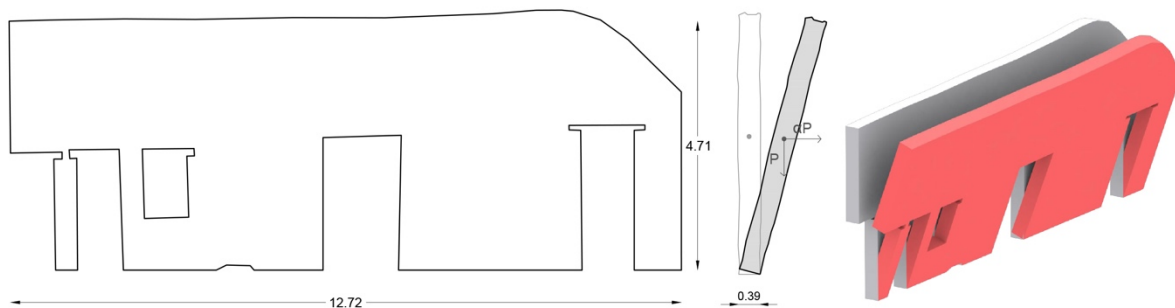
Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
4.18	2.15	0.38	0.040	166.42	0.150	2.150	25.00	357.81	0.070	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.239	0.514	16.96	1	0.686	0.979	NO (70%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
2.155	1.501	0.070	2.15	0.150	0.1499	0.060	0.024	0.576	0.084	NO (71%)	

Si portano di seguito le tabelle riassuntive di ogni meccanismo analizzato indicando tra parentesi la percentuale la capacità del sistema analizzato rispetto alla domanda richiesta dalla normativa.

Macroelemento 2 – ribaltamento fuori piano

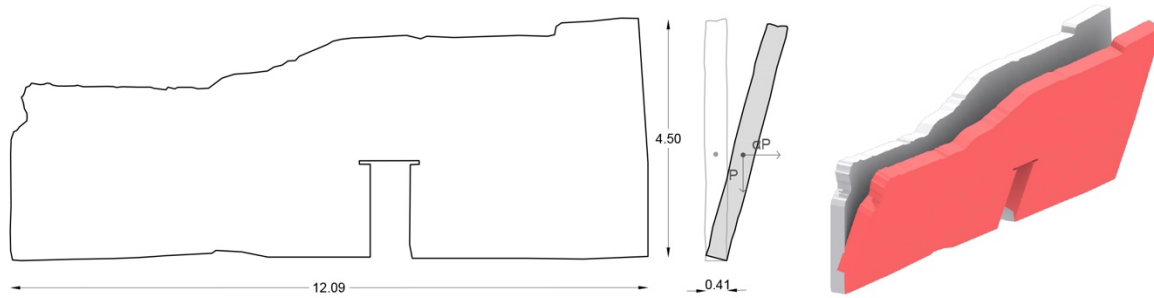


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
6.44	2.61	0.39	0.054	362,13	0.141	2.610	50.91	945.15	0.054	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.212	0.554	36.91	1	0.528	0.979	NO (54%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
2.614	1.517	0.054	2.61	0.140	0.1404	0.056	0.022	0.444	0.093	NO (60%)	

Macroelemento 3 – ribaltamento fuori piano

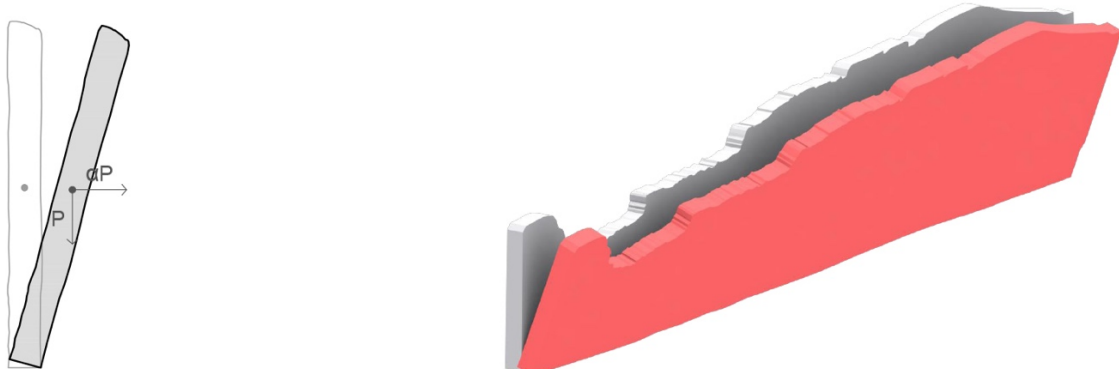
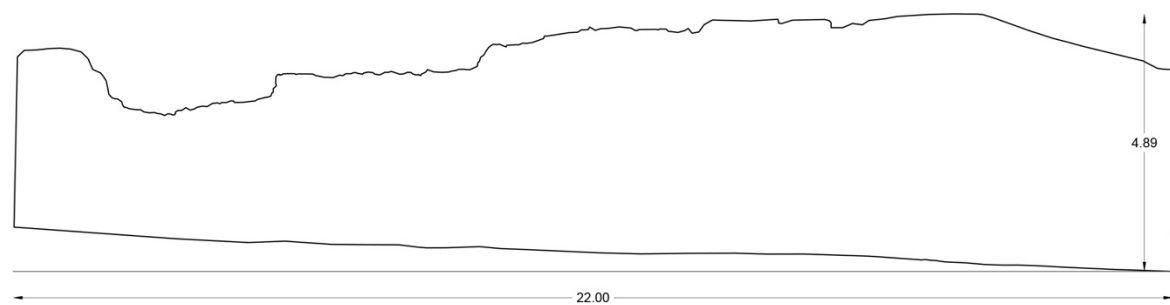


Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
6.41	2.02	0.39	0.052	329.15	0.143	2.020	47.02	664.89	0.071

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.263	0.532	33.55	1	0.694	0.979	NO (71%)	

Verifica non lineare											
R_p [m]	β_p [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata	
2.025	1.500	0.071	2.02	0.142	0.1425	0.057	0.023	0.583	0.082	NO (70%)	

Macroelemento 4 – ribaltamento fuori piano

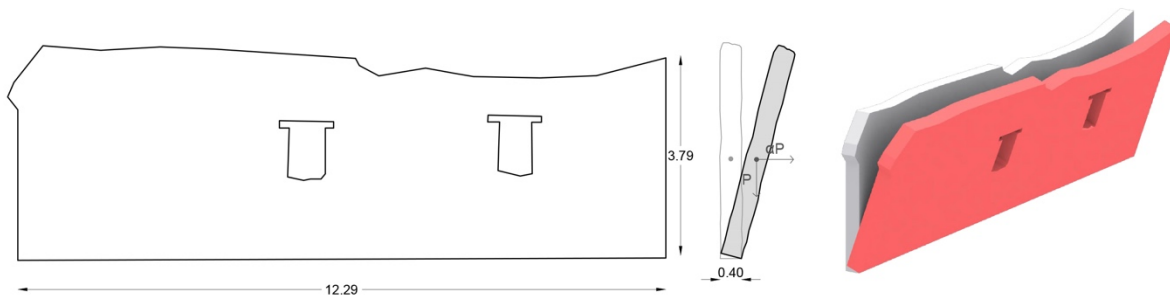


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_s [kNm]	M_R [kNm]	α	
12.05	2.33	0.42	0.058	667.29	0.152	2.330	101.41	1554.78	0.065	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.233	0.542	68.02	1	0.640	0.979	NO (65%)	

Verifica non lineare											
R_p [m]	β_p [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata	
2.335	1.506	0.065	2.33	0.152	0.1517	0.061	0.024	0.538	0.088	NO (69%)	

Macroelemento 5 – ribaltamento fuori piano

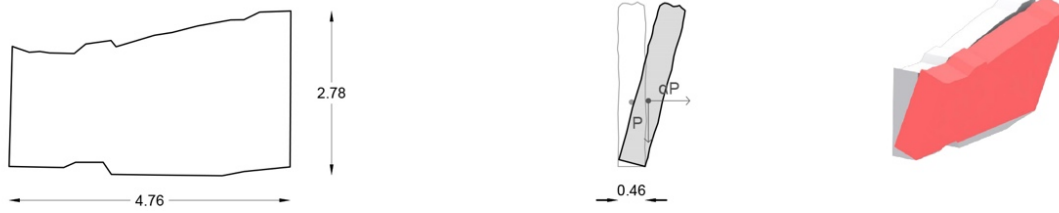


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_s [kNm]	M_R [kNm]	α	
5.90	1.89	0.40	0.053	338.20	0.147	1.890	49.84	639.20	0.078	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.264	0.499	34.48	1	0.765	0.979	NO (78%)	

Verifica non lineare											
R_p [m]	β_p [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata	
1.896	1.493	0.078	1.89	0.147	0.1469	0.059	0.024	0.643	0.079	NO (74%)	

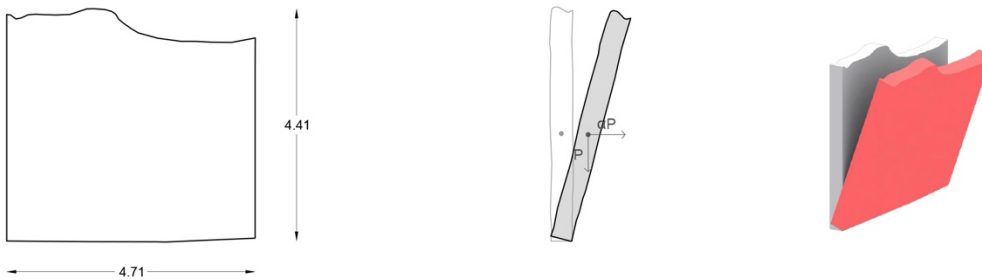
Macroelemento 6 – ribaltamento fuori piano



Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
2.56	1.09	0.46	0.038	95.35	0.192	1.090	18.28	103.94	0.176

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.415	0.452	9.72	1	1.725	0.979	SI (176%)

Macroelemento 7 – ribaltamento fuori piano

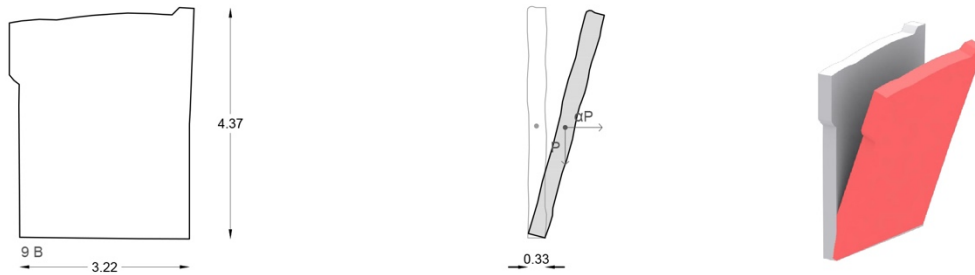


Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
2.28	2.04	0.39	0.058	141.75	0.137	2.040	19.49	289.18	0.067

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.244	0.499	14.45	1	0.661	0.979	NO (68%)

Verifica non lineare										
R_p [m]	β_p [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata
2.045	1.504	0.067	2.04	0.137	0.1372	0.055	0.022	0.555	0.082	NO (67%)

Macroelemento 8 – ribaltamento fuori piano

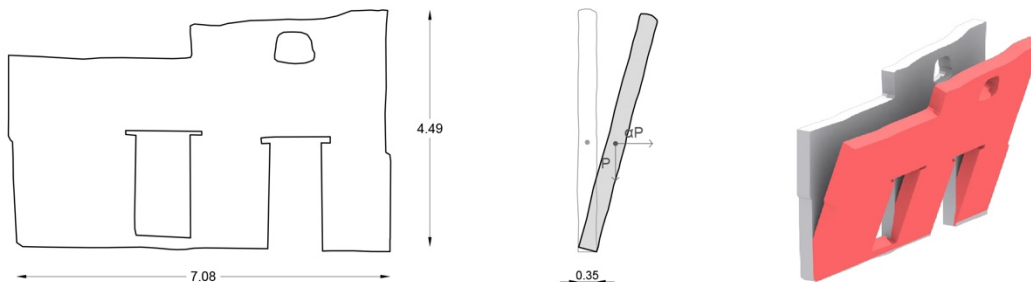


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
1.61	2.12	0.33	0.052	87.28	0.113	2.120	9.87	185.03	0.053	

Verifica Lineare							
θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.236	0.501	8.90	1	0.523	0.979	NO (53%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
2.123	1.518	0.053	2.12	0.113	0.1129	0.045	0.018	0.439	0.084	NO (54%)	

Macroelemento 9 – ribaltamento fuori piano

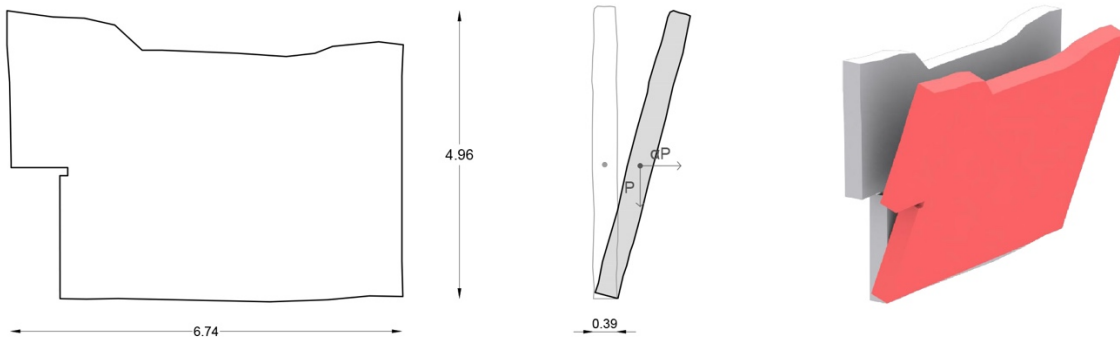


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
3.51	2.08	0.35	0.043	158.94	0.132	2.080	21.00	330.58	0.064	

Verifica Lineare							
θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.255	0.531	16.20	1	0.623	0.979	NO (64%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
2.084	1.507	0.063	2.08	0.132	0.1318	0.053	0.021	0.523	0.083	NO (63%)	

Macroelemento 10 – ribaltamento fuori piano

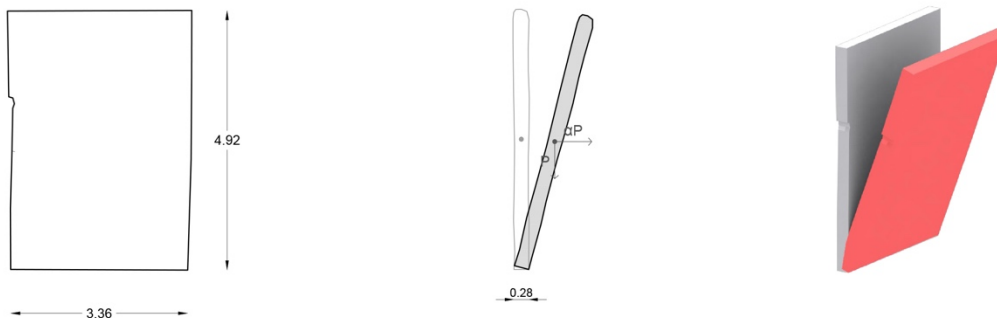


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_s [kNm]	M_F [kNm]	α	
3.47	2.31	0.41	0.062	219.52	0.143	2.310	31.36	507.10	0.062	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.202	0.466	22.38	1	0.607	0.979	NO (62%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata	
2.314	1.509	0.062	2.31	0.143	0.1426	0.057	0.023	0.510	0.088	NO (65%)	

Macroelemento 11 – ribaltamento fuori piano

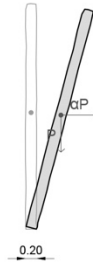
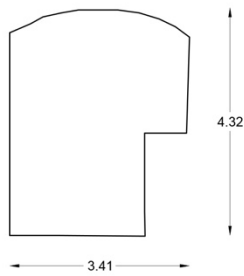


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_s [kNm]	M_F [kNm]	α	
1.70	2.47	0.28	0.047	85.71	0.093	2.470	7.99	211.69	0.038	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.204	0.504	8.74	1	0.370	0.979	NO (38%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata	
2.472	1.533	0.038	2.47	0.093	0.0931	0.037	0.015	0.311	0.091	NO (41%)	

Macroelemento 12 – ribaltamento fuori piano

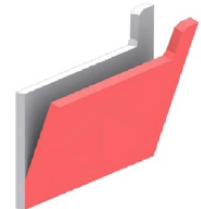
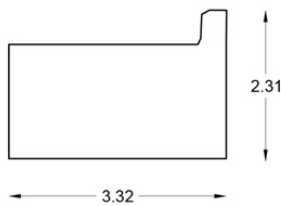


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
1.53	2.21	0.20	0.026	47.20	0.074	2.210	3.47	104.30	0.033	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.246	0.544	4.81	1	0.326	0.979	NO (33%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
2.211	1.538	0.033	2.21	0.074	0.7350	0.029	0.012	0.274	0.086	NO (34%)	

Macroelemento 13 – ribaltamento fuori piano

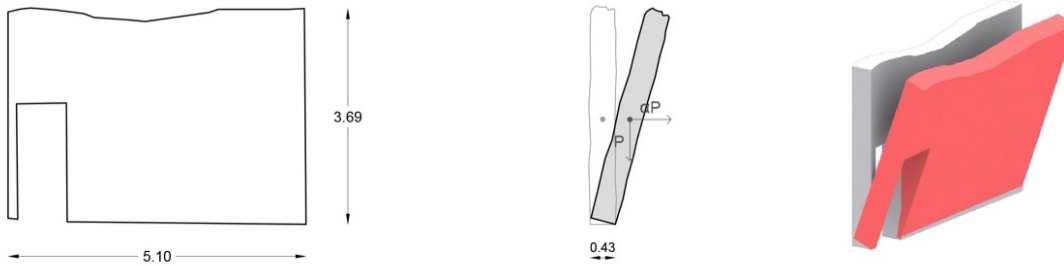


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
1.71	0.92	0.15	0.010	17.10	0.065	0.920	1.11	15.73	0.071	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.559	0.514	1.74	1	0.695	0.979	NO (71%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
0.922	1.500	0.071	0.92	0.065	0.065	0.026	0.010	0.584	0.055	NO (47%)	

Macroelemento 14 – ribaltamento fuori piano

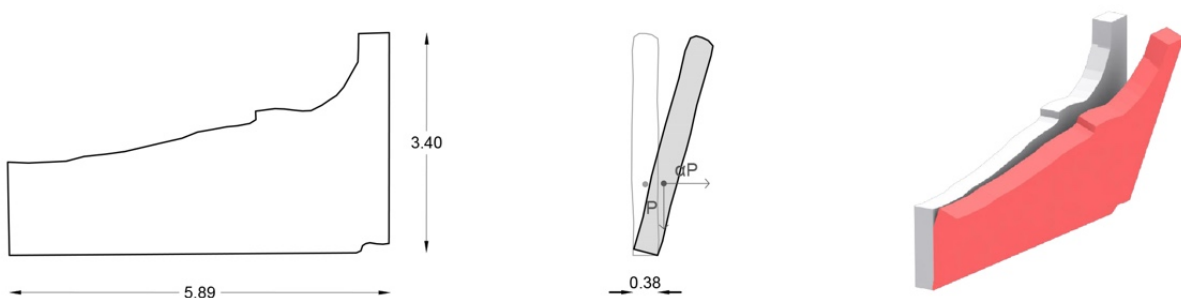


Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
2.76	1.80	0.43	0.049	134.64	0.166	1.800	22.34	242.35	0.092

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.272	0.489	13.72	1	0.904	0.979	NO (92%)

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
1.808	1.479	0.092	1.80	0.165	0.1652	0.066	0.026	0.759	0.077	NO (86%)	

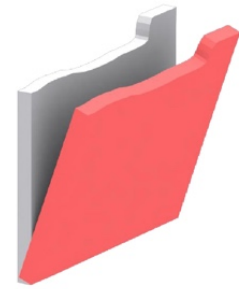
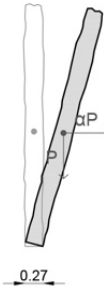
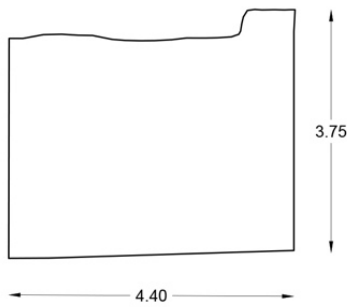
Macroelemento 15 – ribaltamento fuori piano



Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
3.33	1.10	0.38	0.027	83.97	0.163	1.100	13.67	92.37	0.148

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.490	0.539	8.56	1	1.451	0.979	SI (148%)

Macroelemento 16 – ribaltamento fuori piano

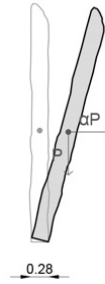
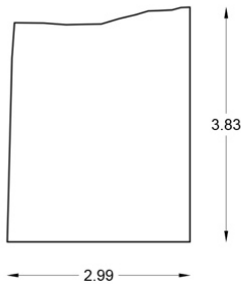


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
2.24	1.77	0.27	0.034	77.16	0.101	1.770	7.82	136.56	0.057	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.294	0.521	7.86	1	0.562	0.979	NO (57%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_o^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
1.773	1.514	0.057	1.77	0.101	0.1012	0.040	0.016	0.472	0.077	NO (53%)	

Macroelemento 17 – ribaltamento fuori piano

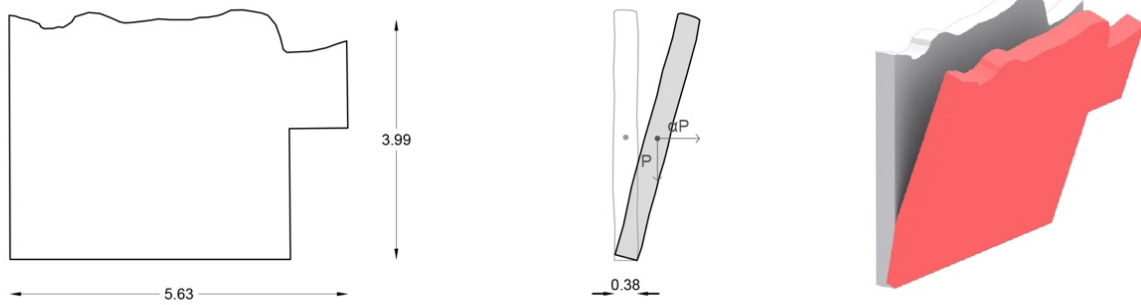


Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α	
1.54	1.82	0.28	0.036	57.03	0.104	1.820	5.91	103.80	0.057	

Verifica Lineare							
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata	
0.260	0.474	5.81	1	0.558	0.979	NO (57%)	

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_o^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
1.823	1.514	0.057	1.82	0.103	0.1034	0.041	0.017	0.469	0.078	NO (53%)	

Macroelemento 18 – ribaltamento fuori piano

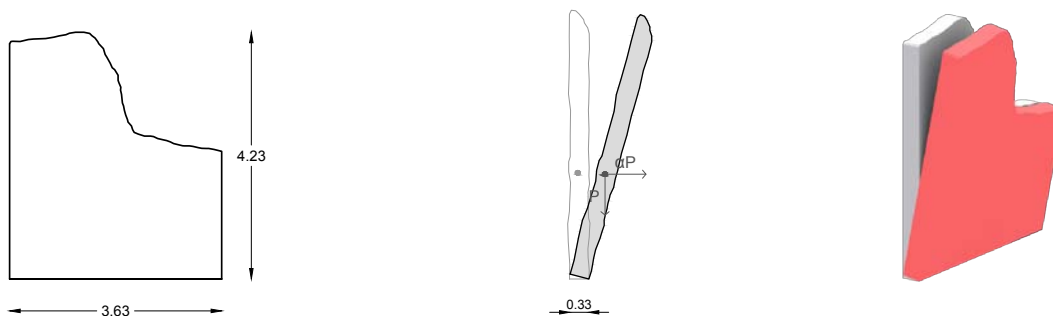


Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
2.50	2.05	0.38	0.059	143.75	0.131	2.050	18.86	294.69	0.064

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.250	0.513	14.65	1	0.628	0.979	NO (64%)

Verifica non lineare											
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_1^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_S)$	Verificata	
2.054	1.507	0.064	2.05	0.131	0.1309	0.052	0.021	0.527	0.083	NO (63%)	

Macroelemento 19 – ribaltamento fuori piano

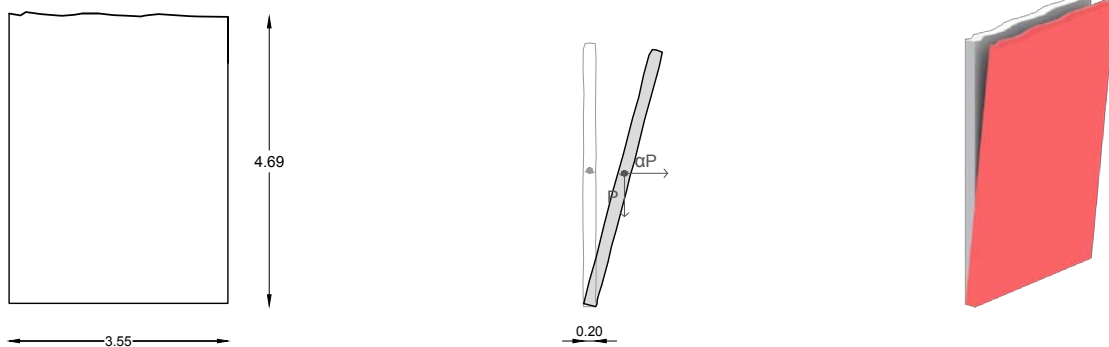


Moltiplicatore dei carichi									
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_S [kNm]	M_R [kNm]	α
1.56	1.74	0.33	1.493	74.30	0.143	1.740	10.64	129.28	0.082

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.236	0.411	7.57	1.00	0.807	0.979	NO (82%)

Verifica non lineare										
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata
1.746	1.489	0.082	1.74	0.143	0.1427	0.057	0.023	0.678	0.076	NO (75%)

Macroelemento 20 – ribaltamento fuori piano



Moltiplicatore dei carichi										
X_{bar} [m]	Y_{bar} [m]	s [m]	t [m]	P [kN]	b_s [m]	b_r [m]	M_s [kNm]	M_R [kNm]	α	
1.77	2.34	0.20	0.019	63.04	0.081	2.340	5.11	147.52	0.035	

Verifica Lineare						
Θ [rad]	$\delta_{x,P}$ [mm]	M^* [kg]	e^*	a_0^* [m/s ²]	$a_g^*P_{VR}^*S/q$ [m/s ²]	Verificata
0.213	0.499	6.43	1.00	0.340	0.979	NO (35%)

Verifica non lineare										
R_P [m]	β_P [m]	Θ [rad]	Y_{bar} [m]	d_{k0} [m]	d_0^* [m]	d_u^* [m]	d_s^* [m]	a_s^* [m/s ²]	$S_{De}(T_s)$	Verificata
2.341	1.536	0.035	2.34	0.081	0.0810	0.032	0.013	0.285	0.088	NO (37%)

4.6 Osservazioni

Sono stati analizzati i meccanismi di collasso per ogni macroelemento evidenziato in fig.4.6 ricavando da ognuno il rispettivo coefficiente α che attiva il meccanismo di ribaltamento fuori piano, l'accelerazione sismica spettrale a_0^* e lo spostamento ultimo d_u^* . Per ogni elemento, inoltre, è stata riportata una percentuale intesa come rapporto tra la capacità di risposta dell'elemento e la domanda richiesta dall'azione sismica. Successivamente, sia per l'analisi lineare, sia per quella non lineare si sono riportati in un istogramma tali valori, organizzando in ascissa il numero identificativo del macroelemento e in ordinata il valore di soddisfacimento della domanda. Le barre verticali che superano la soglia del valore unitario corrispondono ai macroelementi verificati. Dal grafico di fig.4.7 è facile riconoscere quali siano i macroelementi più vulnerabili, corrispondenti ai numeri 11,12 e 20.

La tabella 4.10, invece, ordina gli elementi secondo il grado di vulnerabilità, ovvero da quello che si presenta in situazioni più critiche a quello meno vulnerabile, con l'indicazione dei parametri fondamentali che caratterizzano la verifica lineare e non lineare.

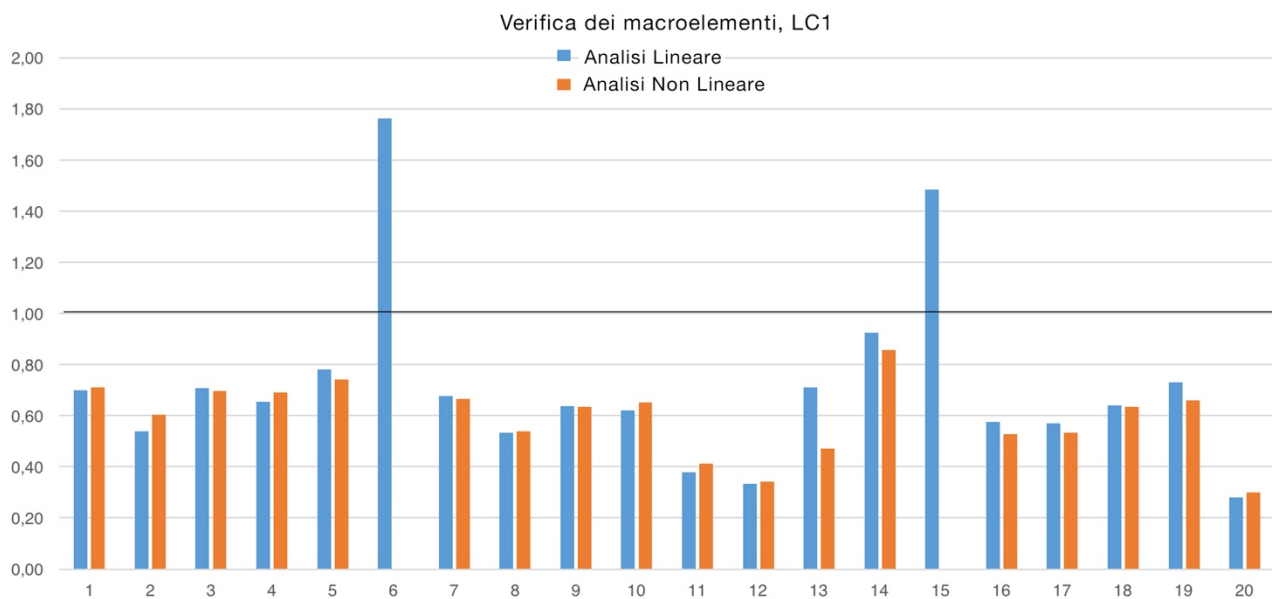


Figura 4.7 – Istogramma del rapporto Capacità/Domanda dei macroelementi, LC1

Tabella 4.10 – Macroelementi in ordine decrescente di vulnerabilità

Macroelementi in ordine di vulnerabilità					
Macroelemento N°	α	a_0^* [m/s ²]	Verifica lineare	d_u^* [m]	Verifica non lineare
20	0.028	0.277	NO (28%)	0.026	NO (30%)
12	0.033	0.326	NO (33%)	0.029	NO (34%)
11	0.038	0.370	NO (38%)	0.037	NO (41%)
8	0.053	0.523	NO (53%)	0.045	NO (54%)
2	0.054	0.528	NO (54%)	0.056	NO (60%)
17	0.057	0.558	NO (57%)	0.041	NO (53%)
16	0.057	0.562	NO (57%)	0.040	NO (53%)
10	0.062	0.607	NO (62%)	0.057	NO (65%)
9	0.064	0.623	NO (64%)	0.053	NO (63%)
18	0.064	0.628	NO (64%)	0.052	NO (63%)
4	0.065	0.640	NO (65%)	0.061	NO (69%)
7	0.067	0.661	NO (68%)	0.055	NO (67%)
1	0.070	0.686	NO (70%)	0.060	NO (71%)
3	0.071	0.694	NO (71%)	0.057	NO (70%)
13	0.071	0.695	NO (71%)	0.026	NO (47%)
19	0.072	0.710	NO (73%)	0.050	NO (66%)
5	0.078	0.765	NO (78%)	0.059	NO (74%)
14	0.092	0.904	NO (92%)	0.066	NO (86%)
15	0.148	1.451	SI (148%)	-	-
6	0.176	1.725	SI (176%)	-	-

Utilizzando la stessa scala di colori della mappa di pericolosità sismica italiana si sono realizzate le immagini 4.8 e 4.9, rispettivamente in pianta e tridimensionale, che descrivono il diverso rischio di collasso.

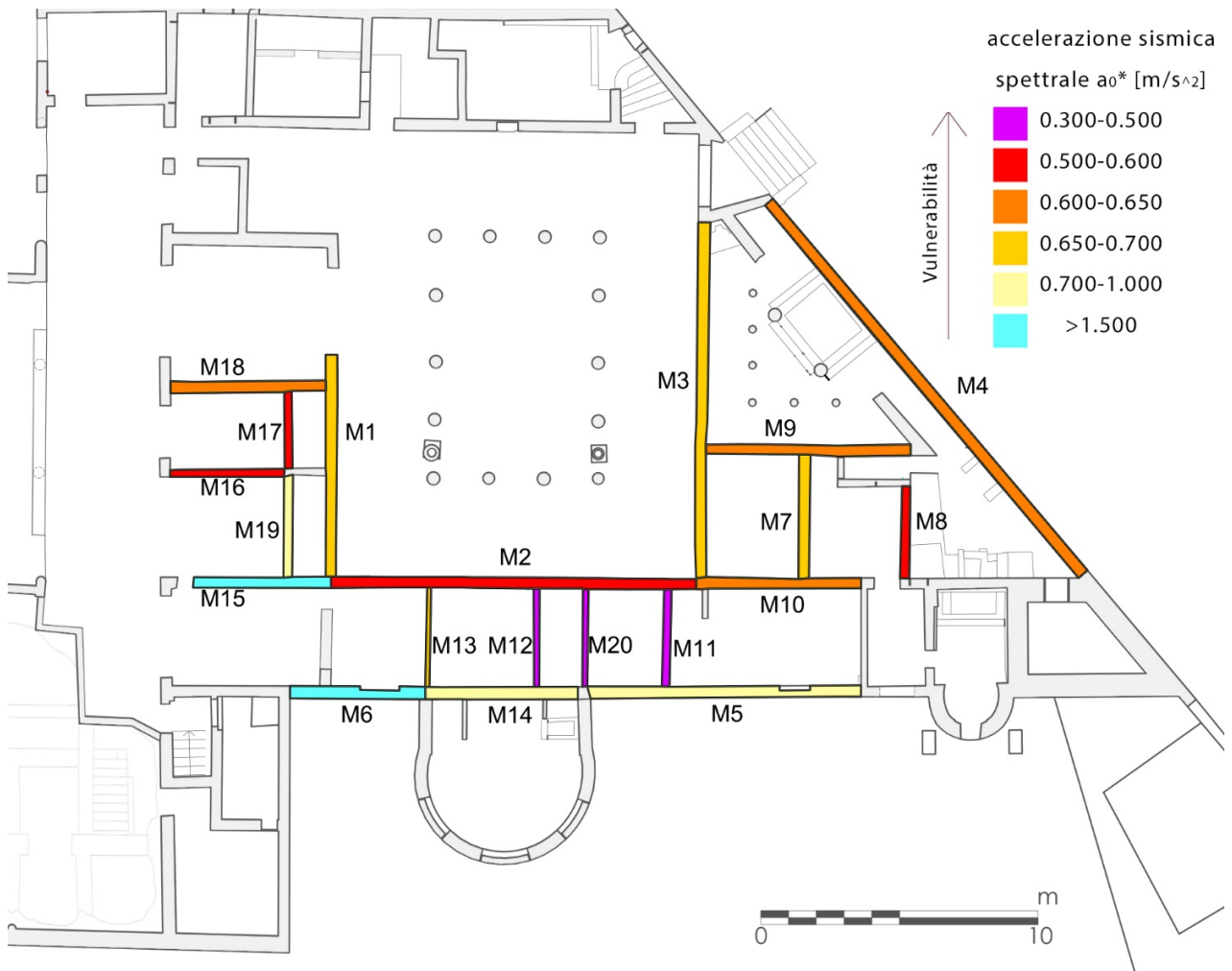


Figura 4.8 – Scala di colori utilizzata per la classificazione degli elementi più vulnerabili

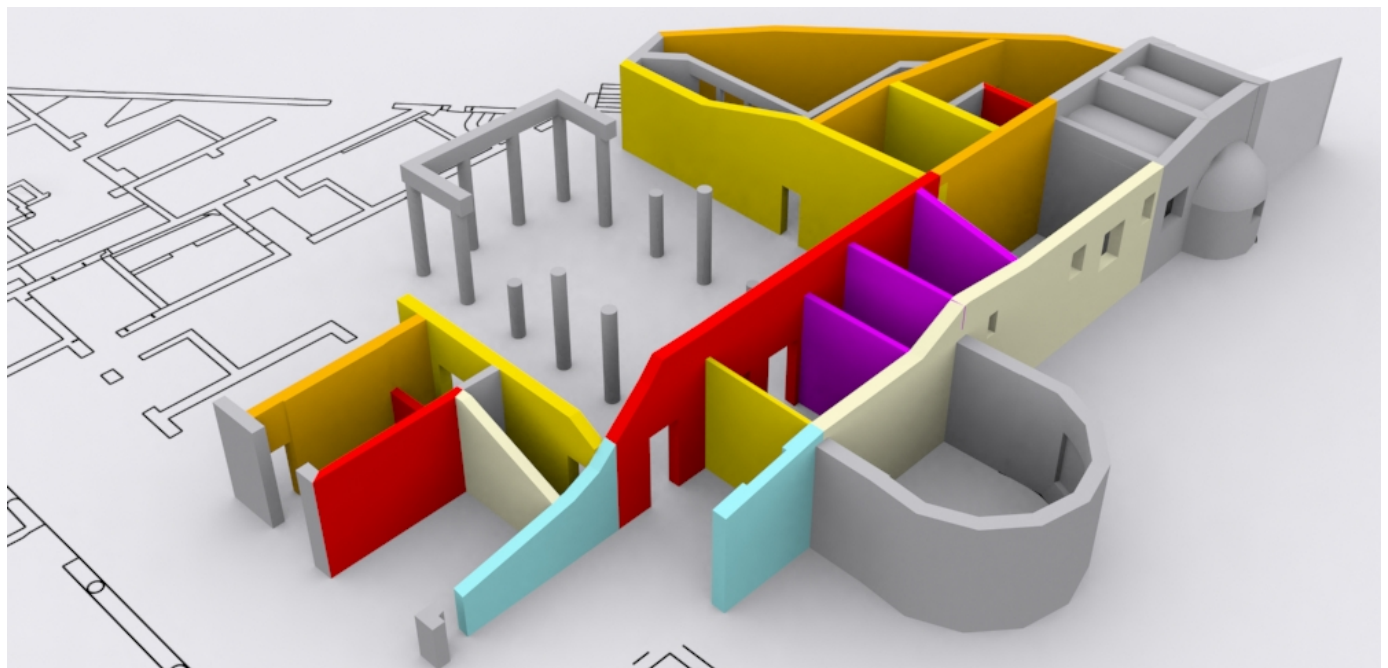


Figura 4.9 - Restituzione tridimensionale degli elementi ordinati secondo la scala macrosismica

La situazione che emerge dai cinematici è critica. Come accennato al paragrafo 4.2.1 è stata effettuata una simulazione considerando un livello di conoscenza LC2, che modificherà il fattore di confidenza F_c e i parametri meccanici della muratura come in tabella 4.5, indicando la variazione percentuale dei parametri di confronto legati alle verifiche lineari e non lineari.

Anche in questo caso la situazione appare critica, sebbene le capacità dei vari macroelementi aumentano mediamente del 16% le verifiche, sia lineari che non lineari, non vengono soddisfatte ad eccezione dell'elemento numero 14 che si classifica come linearmente verificato aggiungendosi agli elementi numeri 6 e 15 già verificati con LC1.

L'istogramma di fig.4.10 è riferito al livello di conoscenza LC2 e dimostra nuovamente la criticità di Villa Diomede.

In tabella 4.11 si schematizzano le variazioni percentuali dei parametri α , a_0^* ; d_u^* nel passaggio da LC1 a LC2.

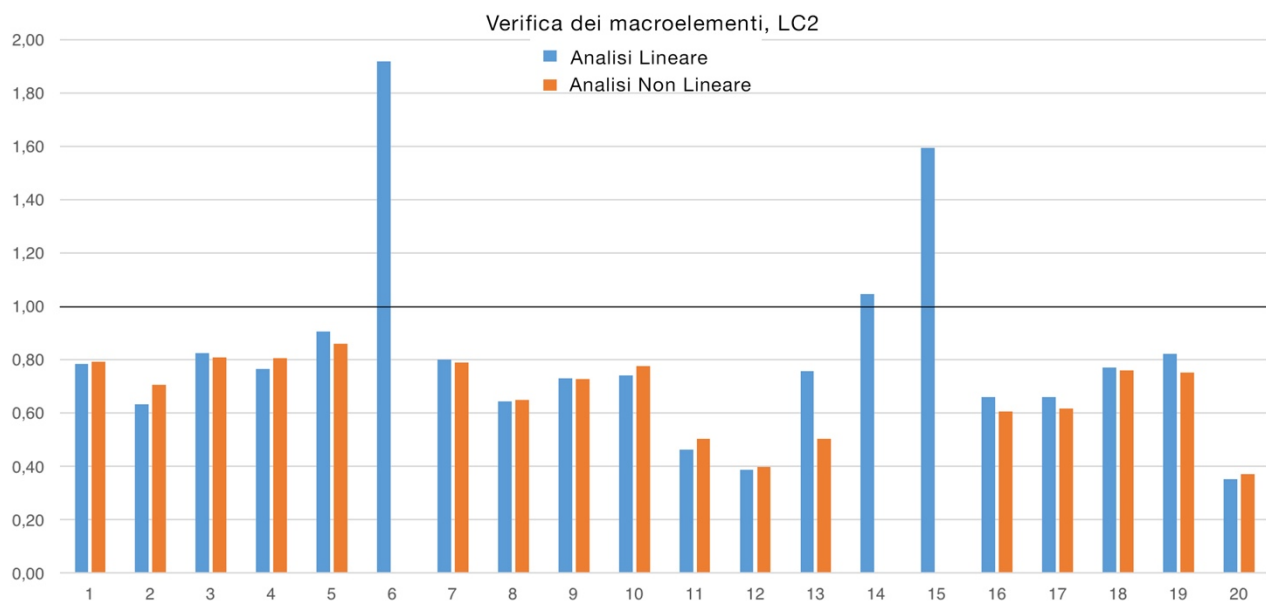


Figura 4.10 – Istogramma del rapporto Capacità/Domanda dei macroelementi, LC2

Tabella 4.11 – Confronto tra LC1 e LC2

blocco	α critico			Analisi Lineare					Analisi NON Lineare				
	α LC1	α LC2	var. %	a_0^* [m/s ²]	ver	a_0^* [m/s ²]	ver	var. %	d_u^* [m]	ver	d_u^* [m]	ver	var. %
1	0.070	0.078	+11	0.686	NO	0.766	NO	+11	0.060	NO	0.067	NO	+11
2	0.054	0.063	+17	0.528	NO	0.619	NO	+17	0.056	NO	0.066	NO	+17
3	0.071	0.082	+16	0.694	NO	0.806	NO	+16	0.057	NO	0.066	NO	+16
4	0.065	0.076	+16	0.640	NO	0.748	NO	+16	0.061	NO	0.071	NO	+16
5	0.078	0.090	+15	0.765	NO	0.886	NO	+15	0.059	NO	0.068	NO	+15
6	0.176	0.191	+8	1.725	SI	1.878	SI	+8	-	-	-	-	-

7	0.067	0.080	+18	0.661	NO	0.783	NO	+18	0.055	NO	0.065	NO	+18
8	0.053	0.064	+20	0.523	NO	0.629	NO	+20	0.045	NO	0.054	NO	+20
9	0.064	0.073	+14	0.623	NO	0.712	NO	+14	0.053	NO	0.060	NO	+14
10	0.062	0.074	+19	0.607	NO	0.723	NO	+19	0.057	NO	0.068	NO	+19
11	0.038	0.046	+22	0.370	NO	0.452	NO	+22	0.037	NO	0.046	NO	+22
12	0.033	0.039	+15	0.326	NO	0.378	NO	+15	0.029	NO	0.034	NO	+15
13	0.071	0.076	+6	0.695	NO	0.741	NO	+6	0.026	NO	0.028	NO	+6
14	0.092	0.104	+13	0.904	NO	1.022	SI	+13	0.066	NO	-	-	-
15	0.148	0.159	+7	1.451	SI	1.559	SI	+7	-	-	-	-	-
16	0.057	0.066	+14	0.562	NO	0.644	NO	+14	0.040	NO	0.046	NO	+14
17	0.057	0.066	+16	0.558	NO	0.645	NO	+16	0.041	NO	0.048	NO	+15
18	0.064	0.077	+19	0.628	NO	0.752	NO	+19	0.052	NO	0.063	NO	+19
19	0.072	0.082	+14	0.710	NO	0.807	NO	+14	0.050	NO	0.057	NO	+14
20	0.280	0.350	+25	0.277	NO	0.340	NO	+23	0.026	NO	0.032	NO	+23

Al fine di semplificare le osservazioni sopra riportate si sono suddivisi i venti paramenti analizzati secondo tre livelli di vulnerabilità suggerendo quali murature siano da privilegiare per eventuali futuri interventi da realizzarsi a Villa Diomede. Gli elementi in rosso della fig.4.11 corrispondono a quelle altamente vulnerabili, quelli in arancione e giallo sono rispettivamente indice di media e bassa vulnerabilità.

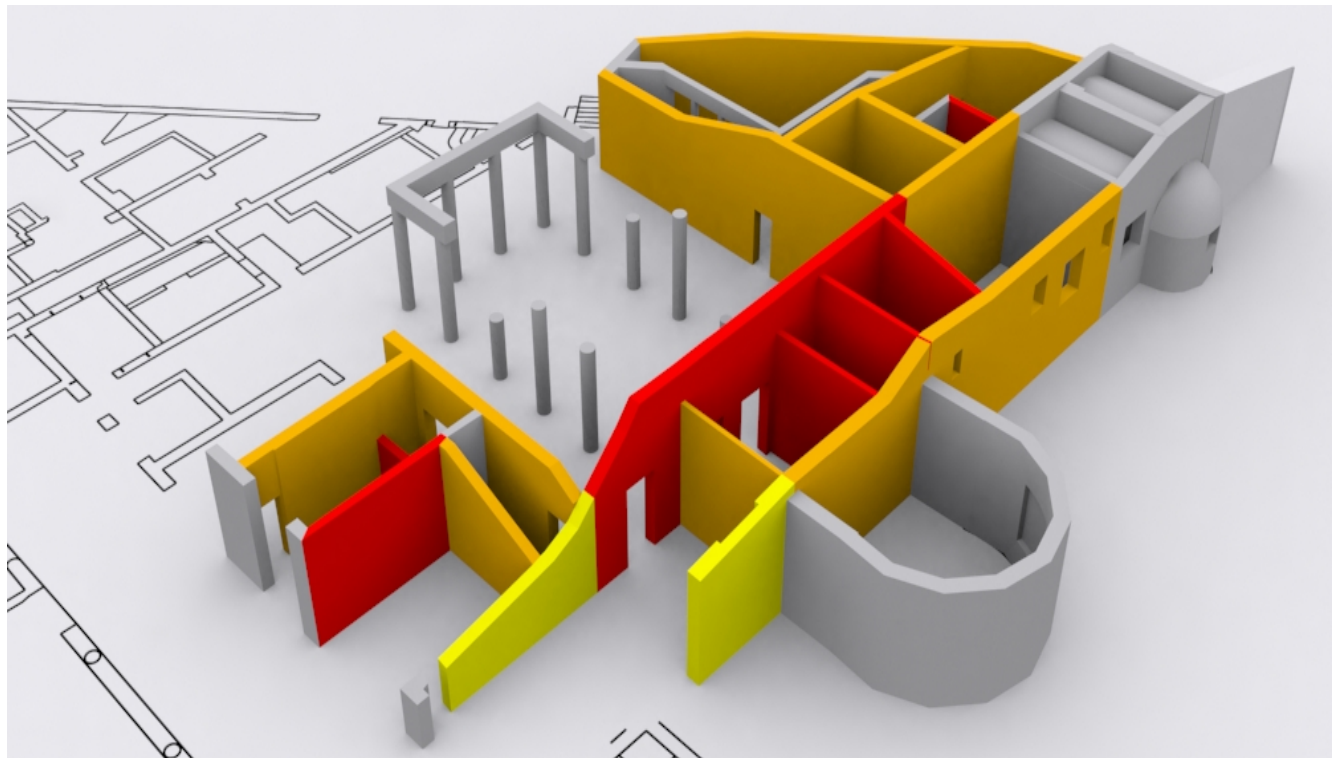


Figura 4.11 – Restituzione tridimensionale degli elementi secondo i tre livelli di vulnerabilità

Gli elementi più vulnerabili fanno parte degli ambienti in cui vi si erano effettuate anche le prove di identificazione dinamica ed è interessante notare come la facciata sud che guarda il peristilio sia una delle pareti a più alto rischio di ribaltamento in caso di fenomeni sismici. Le altre pareti colorate di rosso sono anch'esse fortemente vulnerabili soprattutto per il loro spessore murario che risulta inferiore in relazione agli altri elementi analizzati e di conseguenza, date le altezze pressochè uguali, più debole. Tutti gli altri elementi risultano mediamente vulnerabili, con un rapporto C/D (capacità/domanda) variabile dal 60% al 100%. Gli unici due elementi in giallo sono i macroelementi n°6 e n° 15 in cui evidentemente le loro caratteristiche geometriche e meccaniche li rendono più solidi.

CONCLUSIONI

I capitoli di tesi affrontati hanno avuto come filo conduttore la valutazione della vulnerabilità sismica di una porzione di Villa Diomede e lo studio del comportamento strutturale di parti significative del complesso considerati più vulnerabili e quindi a maggior rischio di collasso in caso di fenomeni sismici.

Si è cercato di studiare la struttura in tutta la sua complessità sfruttando le informazioni presenti nelle varie pubblicazioni, a partire dal sito archeologico di Pompei, fornendo le generalità in cui inquadrare Villa Diomede.

Per arginare la limitata conoscenza dell'edificio si sono svolte una serie di prove tra cui soniche, georadar, endoscopiche e di identificazione dinamica, tutte indagini non distruttive che privilegiano il fondamentale interesse per la tutela e la salvaguardia del bene.

I risultati delle prove soniche e tomografiche indicano, sebbene da un punto di vista qualitativo, una scarsa qualità del materiale costituente i paramenti e il nucleo interno. Solo puntualmente si individuano dei picchi di velocità dei pannelli murari risultando comunque relativamente basse rispetto a murature recenti (circa 1000m/s contro i 3000m/s). Lo stato di degrado avanzato non è stato favorevole all'esecuzione di questo tipo di prova e potrebbe aver influito sull'ipotesi di percorso rettilineo tra i due punti, emittente e ricevente, riscontrando nelle elaborazioni velocità anche inferiori a 340m/s, indice di pessima qualità dei pannelli indagati. Quanto esposto è stato confermato dalle ispezioni effettuate tramite l'endoscopio: sfruttando le cavità e le fessurazioni già presenti si è potuto ricavare delle immagini che descrivono una muratura a sacco notevolmente degradata.

Le prove georadar che vi si sono svolte a Villa Diomede sono state un supporto alle ipotesi di ricostruzione e dei vari cantieri dell'edificio, importante per poter ordinare cronologicamente alcune murature e intuire, di conseguenza, i probabili paramenti non ammortati in grado di aumentare le vulnerabilità dell'edificio. Questo tipo di prova è risultata, tra l'altro, interessante in quanto ha consentito di individuare, al di sotto dell'attuale piano di calpestio, tracce di probabili preesistenze suggerendo la possibilità di verificare la natura delle stesse con saggi localizzati, ma anche di poter prevedere per il futuro una campagna estensiva di misure di tipo georadar, indispensabile per poter definire meglio la distribuzione e l'estensione di ulteriori anomalie, utili per una più completa lettura delle fasi costruttive che hanno interessato la vita della Villa.

Le prove di identificazione dinamica localizzate in diversi punti della Villa hanno sostanzialmente dimostrato che il comportamento delle varie strutture, in relazione agli elementi limitrofi (altre murature, setti trasversali), sono indipendenti creando di fatto una risposta strutturale non unitaria. Soprattutto la prova eseguita al piano terra, tra le murature che racchiudono gli ambienti 12,13,14,15,16, le forme

modali individuate descrivono la non unitarietà nel comportamento delle due pareti nord e sud con il verificarsi di risposte approssimabili a quelle di pareti libere. Anche la prova di identificazione dinamica del muro d'ambito est esplicita semplicemente le prime forme flessionali (1°,2°,3°,4° modo), dimostrando che le strutture ad esso collegato non influenzano il suo comportamento, ad eccezione dei pilastri angolari alle estremità che forniscono indicazioni di maggiore rigidità: l'attivazione della loro risposta si ha a frequenze maggiori. Il quadriportico, non presentando orizzontamenti ed essendo una struttura praticamente indipendente in quanto non collegata ad altre parti della costruzione, risponde anch'essa con le forme modali a frequenze corrispondenti sia per il lato sud sia per il lato ovest (lati analizzati). Lo studio dei pilastri scelti nello stesso quadriportico suggerisce una maggiore rigidità dell'elemento n°58 rispetto al n°48. Da evidenziare sono le anomalie osservate nel pilastro n°58 e n°15 in cui si nota una risposta anomala difficilmente riscontrabile nei comuni elementi strutturali quali i pilastri. Infatti, si verifica una notevole accelerazione alle basi dei pilastri e questo potrebbe indicare che lo stato di degrado e la riduzione di sezione sono una forte criticità.

La parte conclusiva della tesi ha interessato la valutazione della sicurezza sismica, per questo, non si poteva non fare riferimento alla normativa più recente: il D.M. 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, la Circolare n°617 del 2009 e le Linee Guida. È stato analizzato un insieme di macroelementi individuati con il supporto di quanto precedentemente esposto e vi si sono svolti gli studi dei cinematismi ad essi associati, considerati tutti di ribaltamento fuori piano. La normativa infatti prevede che quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi (meccanismi locali appunto), quando cioè la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico particolarmente nel caso di edifici estesi e di geometria complessa, non dotati di solai rigidi e resistenti nel piano, né di efficaci e diffusi sistemi di catene o tiranti, la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali. È quanto svolto nel caso di Villa Diomede: analizzate 20 murature, soltanto 2 risultano soddisfatte (3 considerando un livello di conoscenza LC2) e mediamente la loro capacità di sopportare le azioni sismiche è il 60% della domanda. Si evince una situazione critica per cui i risultati di questa valutazione di vulnerabilità sono stati riassunti realizzando una suddivisione in tre livelli di vulnerabilità degli elementi: alto, medio e basso rischio di collasso.

L'attribuzione del grado di vulnerabilità ad ogni muratura analizzata indica allo stesso tempo quali siano gli elementi che, in caso di futuri interventi, sono da privilegiare per migliorarne il comportamento o per inserire presidi antisismici. Può essere, inoltre, un suggerimento e un punto di partenza per ulteriori indagini e accrescimento della conoscenza di Villa Diomede, senza dimenticare quanto riportato anche nel paragrafo introduttivo di questa tesi, ovvero la fondamentale priorità della tutela, la conservazione e la fruibilità di un patrimonio storico unico al mondo a cui l'edificio in esame appartiene.

Bibliografia

Beltrami L. (2014), *Indagini non distruttive e valutazione del degrado per la conservazione del Ponte San Lorenzo a Padova*, Tesi di laurea, Rel. Maria Rosa Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2013-2014.

Bonetto A. (2013), *Sviluppo e applicazioni di algoritmi per l'identificazione dinamica e il rilevamento del danno delle strutture civili*, Tesi di Laurea Magistrale, Rel. Prof. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2012-2013.

Deiana R. (2015), *Campagna di indagini georadar presso Villa Diomede-Pompei* Giugno 2015, 26/09/2015, Padova.

Dessales H (2013), *Le partage de l'eau. Fontaines et distribution hydraulique dans l'architecture domestique de l'Occident romain*, Bibliothèque de l'Ecole française de Rome, 351, Roma.

Dessales H et al (2014), *La Villa de Diomède à Pompéi. Des architectes du Grand Tour aux archéomètres d'aujourd'hui*. Rapport d'activités année 2013, Projet PEPS PSL-CNRS.

Dessales H. et al (2014)., "*Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2013*", Cronique des activités archéologiques de l'Ecole française de Rome.

Dessales H et al (2015), "*Pompéi. Villa Diomède. Campagne d'étude 2014*", Cronique des activités archéologiques de l'Ecole française de Rome.

Ewins DJ (1984), *Modal Testing: Theory and Practice*. John Wiley & Sons Inc, USA.

Fabbricino G., Ranieri C., Verderame GM, *L'analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*, Università degli Studi di Napoli – Università degli Studi del Molise – Consorzio ReLUIS.

Fiorelli G. (1860), *Pompeianarum Antiquitatum Historia*, Napoli.

Fiorelli G. (1873), *Gli scavi di Pompei dal 1861 al 1872*, tipografia italiana del Liceo V. Emanuele, Napoli.

Furlani S. (2015), *Vulnerabilità strutturale del teatro romano di Verona mediante modellazione analitica e numerica*, Tesi di laurea, Rel. Maria Rosa Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2014-2015.

Hine H.M. (1984), *The date of the Campanian earthquake A.D. 62 or A.D. 63, or both?*, in "L'Antiquité Classique", Bruxelles, vol.53.

L'italia Monumentale. Collezione di monografie sotto il patronato della Dante Alighieri e del Touring Club Italiano (1917), *Pompei*, Milano, P.Bonomi Editore.

Lagomarsino S., Podestà S. (CD a cura di), *Inventario e vulnerabilità del patrimonio monumentale dei parchi dell'Italia centro- meridionale e meridionale*, Vol.III - Analisi di vulnerabilità e rischio degli edifici monumentali, INGV/GNDT-Istituto Nazionale di geofisica e Vulcanologia / Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, L'Aquila, 2005.

Lorenzoni F. (2013), *Integrated methodologies based on structural health monitoring for the protection of cultural heritage buildings*, Tutor Prof. Claudio Modena, University of Trento, University of Brescia, University of Padova, University of Trieste, University of Udine, University IUAV of Venezia.

Maiuri A. (1935), *Pompei, Itinéraires des musées et monuments de l'Italie*, Roma, Libreria dello Stato.

Maiuri A. (1942), *L'ultima fase edilizia di Pompei*, Roma, Istituto di studi romani.

Mattiello E. (2013), *Analisi di vulnerabilità sismica di palazzo donghi dell'università di padova: studio globale e verifica locale dei macroelementi*, Tesi di Laurea, Rel. Prof. Claudio Modena, Università degli Studi di Padova, 2012-2013.

Milano A., Mannella A., Morisi A., Martinelli A. (a cura di), *Schede illustrative dei principali meccanismi di collasso locali negli edifici esistenti in muratura e dei relativi modelli cinematici di analisi*.

Pesando F. (2012), *Pompei, le età di Pompei*, Milano, 24 Ore Cultura srl.

Rosato L. (2014), *Sviluppo di un nuovo software di elaborazione tomografica per l'applicazione del metodo di indagine sonica per la diagnosi strutturale delle murature esistenti*, Tesi di laurea, Rel. Maria Rosa Valluzzi, Università degli Studi di Padova, 2013-2014.

Sogliano A. (1937), *Pompei preromana dalle origini all'80 a.C., Pompei nel suo sviluppo storico* vol 1, Roma, Società Editrice "Athenaeum".

Normativa e Linee Guida di riferimento

Circolare 2 febbraio 2009, n. 617, Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D. M. 14/01/2008.

Decreto Ministeriale 14/01/2008, Norme Tecniche per le Costruzioni.

Direttiva PCM 12/10/2007, "Direttiva del PCM per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche delle costruzioni del 12/10/2007", G.U. 29 gennaio 2008, n. 24, Supp. Ord. N. 25, 2007

Legge 6 agosto 1981 n. 456

Ordinanza del Presidente del consiglio dei ministri n. 3274 del 20 marzo 2003 - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica

Ordinanza del Presidente del consiglio dei ministri n. 3519 del 28 aprile 2006 - Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone

Raccomandazioni NorMaL 1/88. Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico, CNR-ICR, 1990, Roma.

UNI 11182 – Materiali lapidei naturali ed artificiali: descrizione della forma di alterazione

Sitografia (con indicazione della data di consultazione)

www.ajpnd.it, ottobre 2015

www.archeo.it, settembre 2015

www.architetturadi Pietra.it, ottobre 2015

www.architetturaromana.blogspot.com, settembre 2015

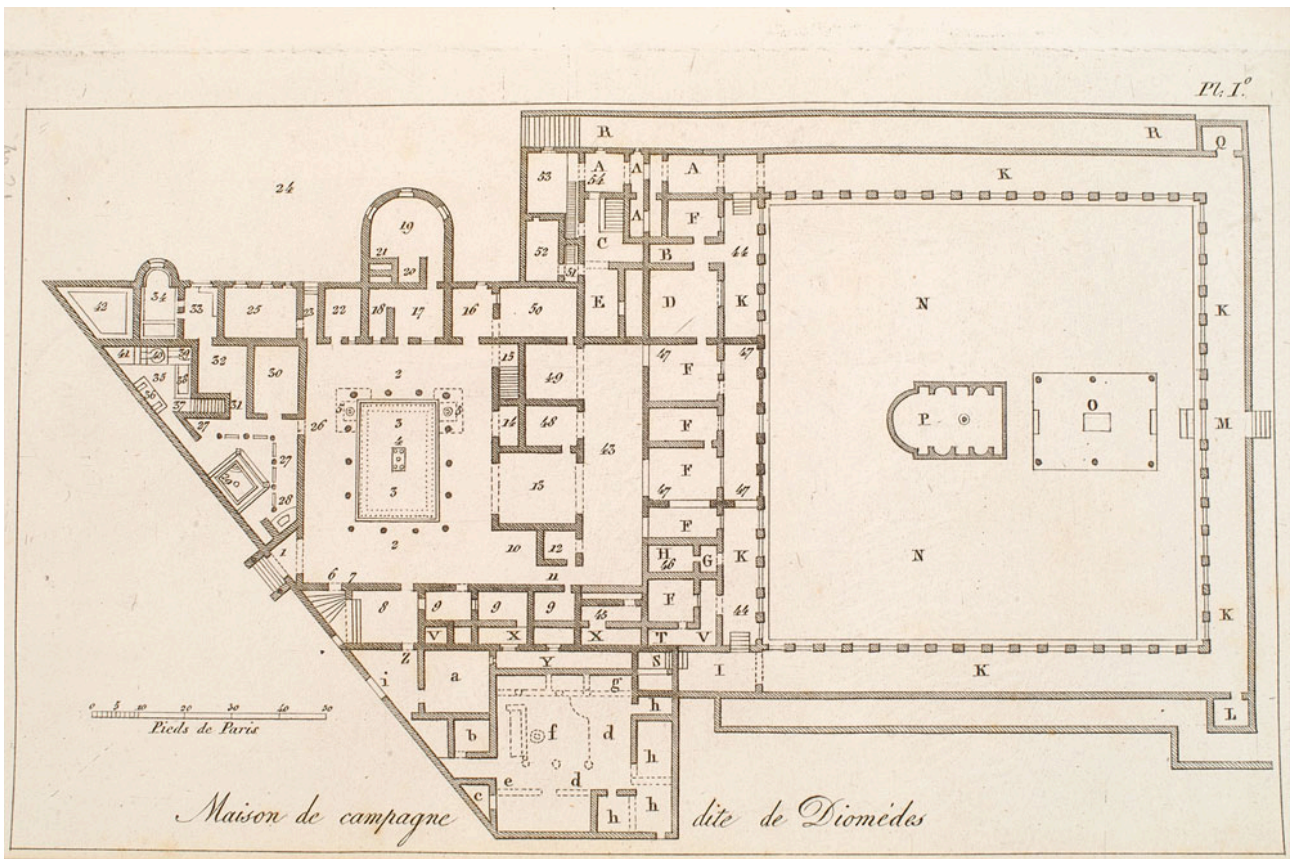
www.cw.routledge.com, ottobre 2015

www.emidius.mi.ingv.it, ottobre 2015

www.esse1.mi.ingv.it, ottobre 2015
www.images.treccani.it, novembre 2015
www.it.wikipedia.org, settembre 2015
www.maps.google.it, settembre 2015
www.ndt.net, ottobre 2015
www.pompei.sns.it, settembre 2015
www.pompeisites.org, ottobre 2015
www.protezionecivile.gov.it, ottobre 2015
www.santagnese.org, settembre 2015
www.storing.ingv.it, ottobre 2015
www.tankonyvtar.hu, ottobre 2015
www.villadiomedeproject.org, da marzo a novembre 2015

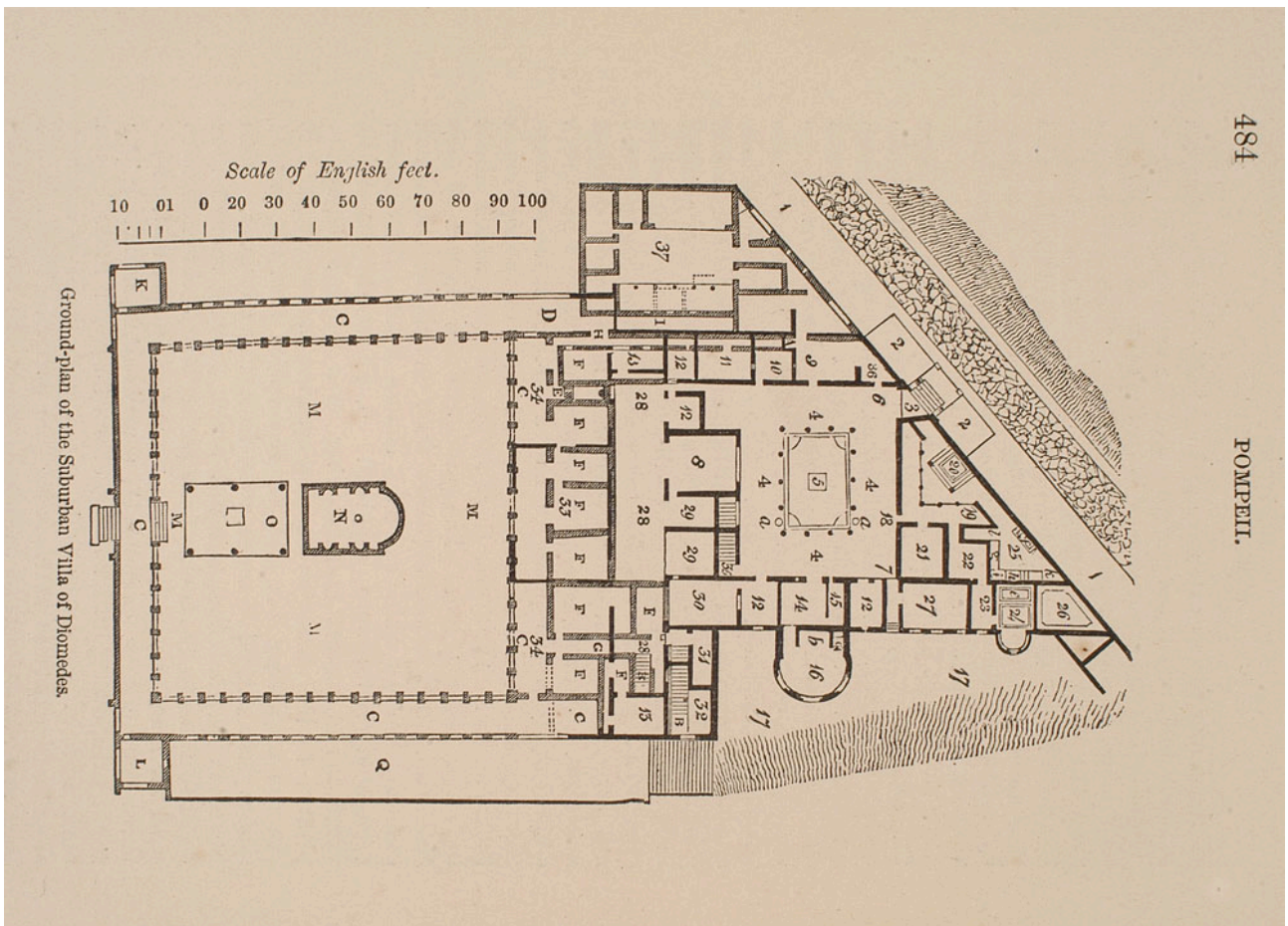
Allegato A
Schede iconografiche

Scheda n° 1
<i>Titolo</i> Maison de campagne dite Diomedes
<i>Tecnica</i> stampa, litografia
<i>Autore</i> De Jorio A.
<i>Anno</i> 1836
<i>Formato</i> 127x215 mm
<i>Soggetto</i> Pianta della Villa di Diomede
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



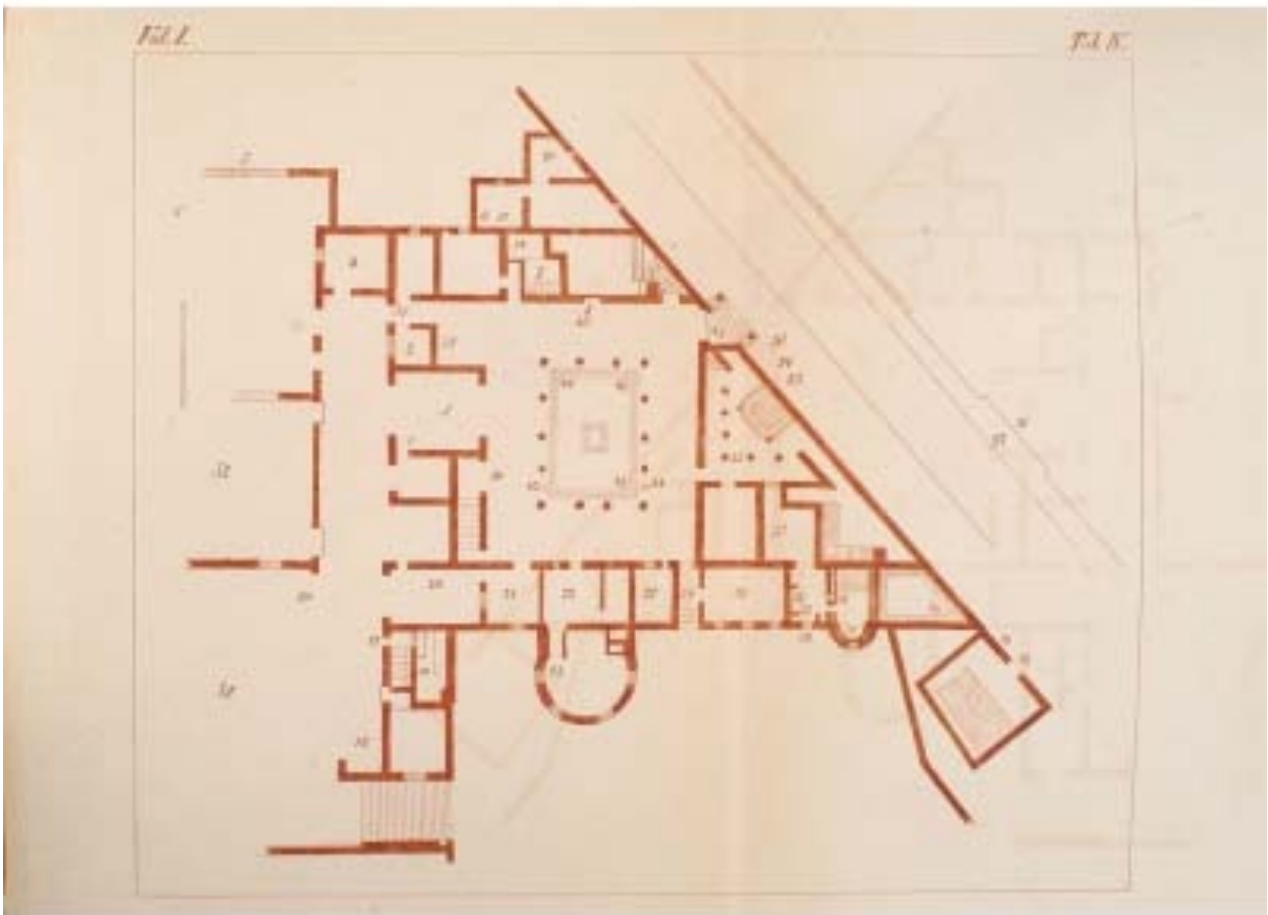
de Jorio A., Guida di Pompei, Napoli, 1836, Tav. I (stampa, litografia mm127x215)

Scheda n° 2
<i>Titolo</i> Ground-plan of the Suburban Villa of Diomedes
<i>Tecnica</i> incisione, xilografia
<i>Autore</i> Dyer T.
<i>Anno</i> 1868
<i>Formato</i> 138x083 mm
<i>Soggetto</i> Pianta della Villa di Diomede
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



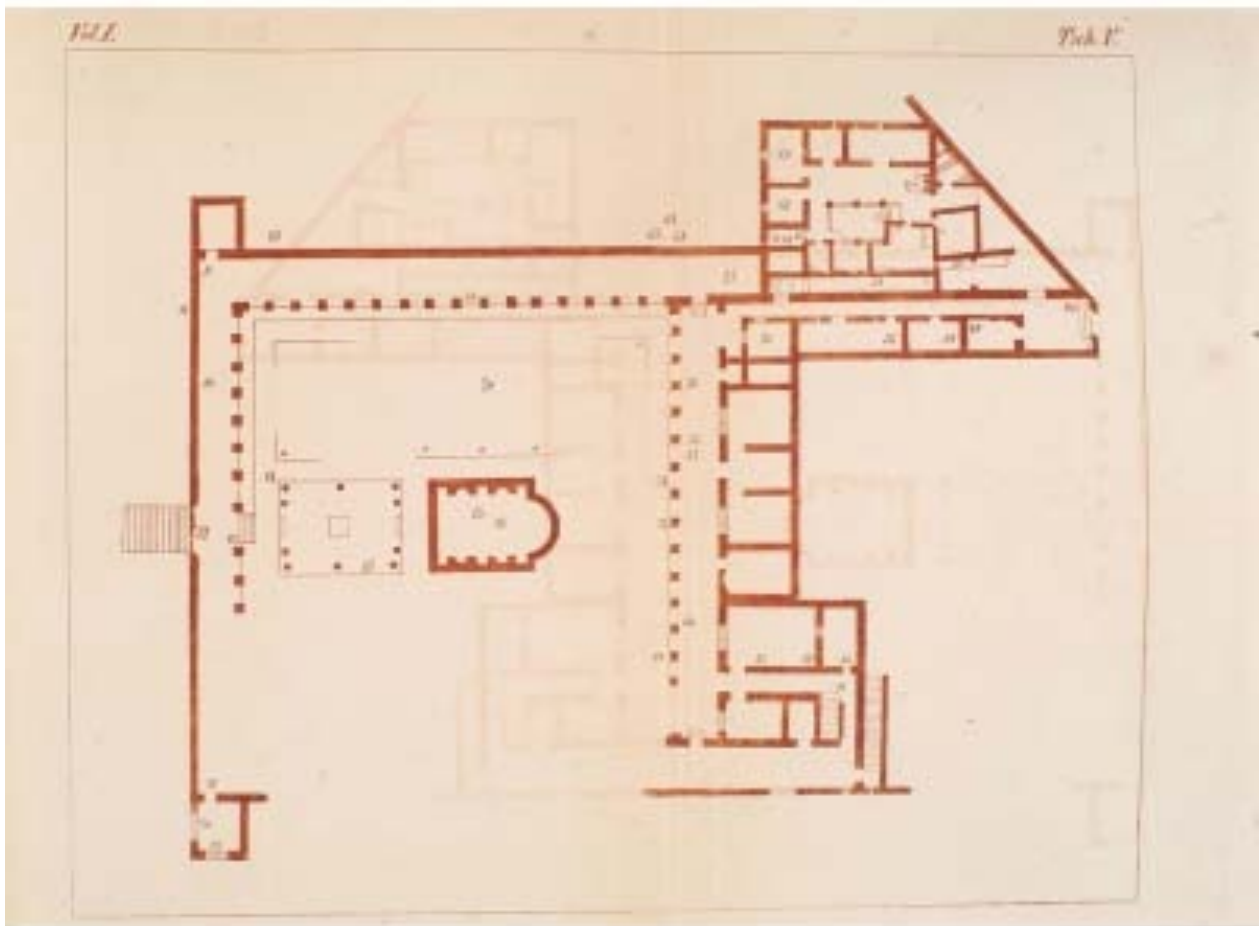
Dyer T., Pompeii, Londra, 1868, P. 484 (incisione, xilografia mm138x083)

Scheda n° 3
<i>Titolo</i> [Pianta del livello inferiore di Villa Diomede]
<i>Tecnica</i> incisione, acquaforte, mezzatinta
<i>Autore</i> Fiorelli G
<i>Anno</i> 1860-1865
<i>Formato</i> [sconosciuto]
<i>Soggetto</i> Pianta del livello superiore di Villa Diomede
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



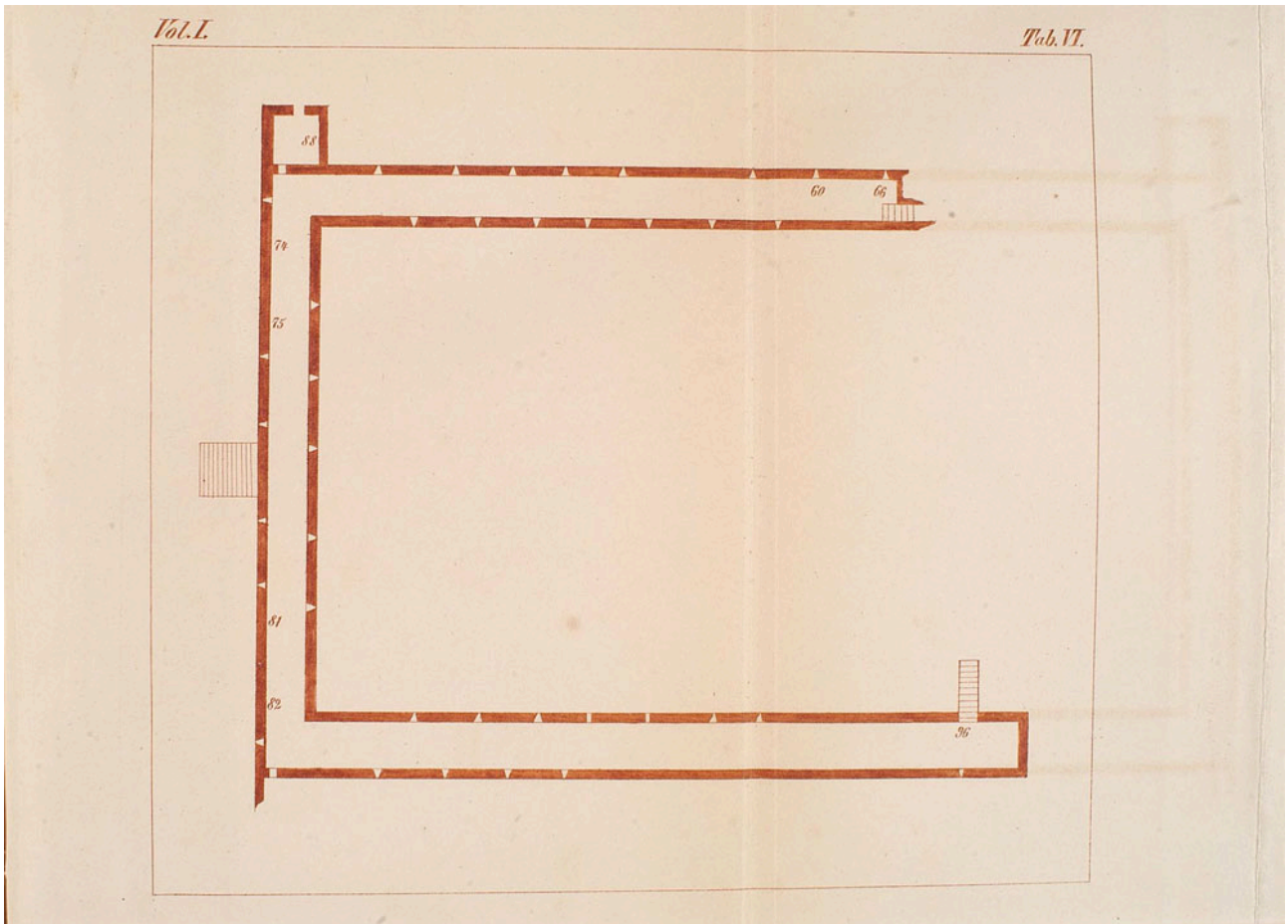
Fiorelli G Pompeianarum Antiquitatum Historia, Napoli, 1860-1865, vo. I tav IV (incisione, acquaforte, mezzatinta)

Scheda n° 4
<i>Titolo</i> [Pianta del livello inferiore di Villa Diomede]
Tecnica incisione, acquaforte, mezzatinta
Autore Fiorelli G
Anno 1860 - 1864
Formato [sconosciuto]
Soggetto Pianta del livello inferiore di Villa Diomede
Bibliografia www.pompei.sns.it



Fiorelli G., *Pompeianarum Antiquitatum Historia*, Napoli, 1860 - 1864, vol. I, Tav. V (incisione, acquaforte, mezzatinta)

Scheda n° 5
<i>Titolo</i> [Pianta del cryptoportico di Villa Diomede]
<i>Tecnica</i> incisione, acquaforte, mezzatinta
<i>Autore</i> Fiorelli G
<i>Anno</i> 1860 - 1864
<i>Formato</i> [sconosciuto]
<i>Soggetto</i> Pianta del cryptoportico di Villa Diomede
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



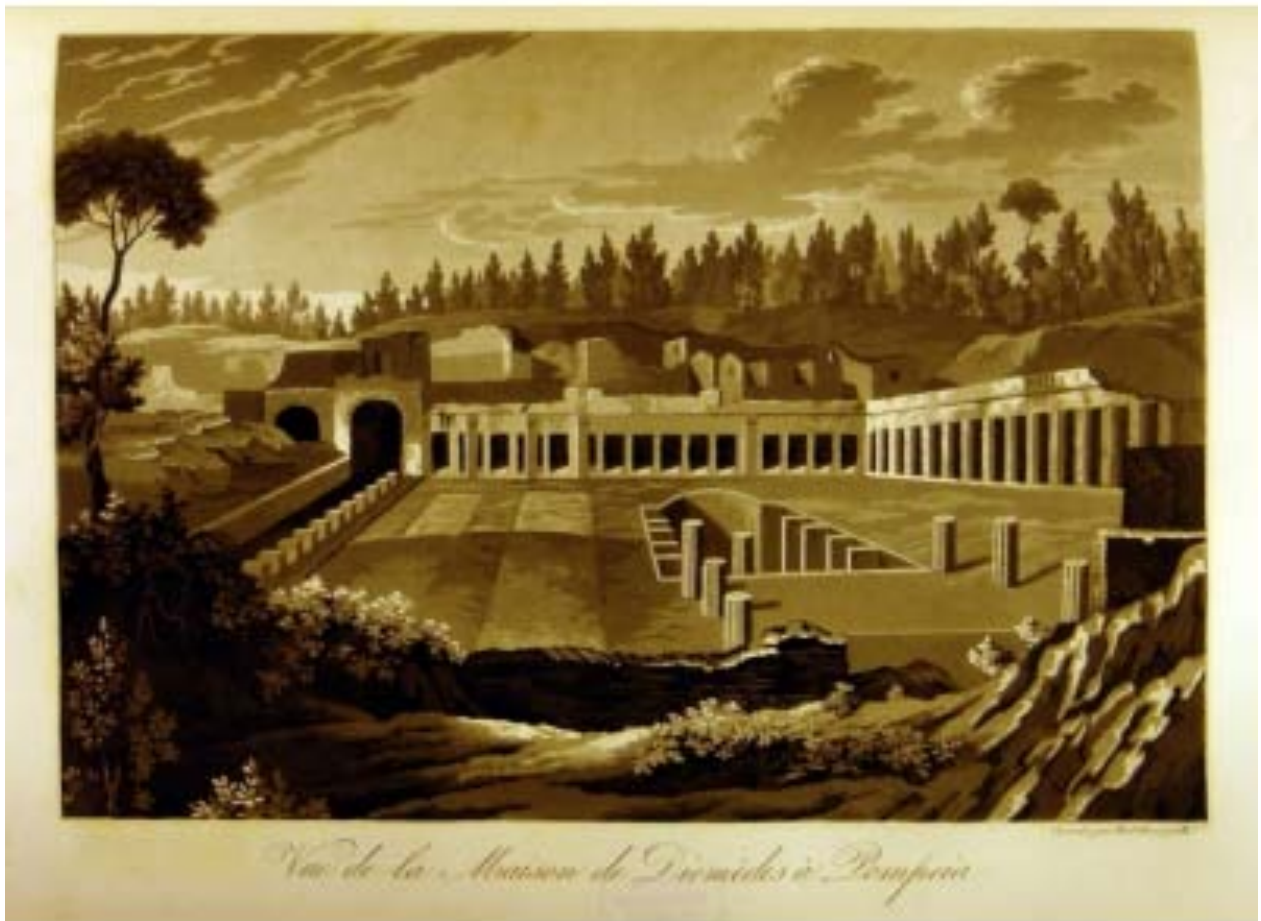
Fiorelli G., *Pompeianarum Antiquitatum Historia*, Napoli, 1860 - 1864, vol. I, Tav. VI (incisione, acquaforte mezzatinta)

Scheda n° 6
<i>Titolo</i> Sale triangolaire et bain dans la Ville Suburbana à Pompeja
Tecnica incisione, acquaforte
Autore Fumagalli P
Anno 1876
Formato [sconosciuto]
Soggetto Ambiente porticato con vasca del frigidarium
Bibliografia www.pompei.sns.it



Fumagalli P., Pompeja. Traité pittoresque, historique et géométrique, Firenze, circa 1876 (incisione acquaforte)

Scheda n° 7	
<i>Titolo</i>	<i>Vue de la Maison de Diomedes à Pompeia</i>
Tecnica	incisione, acquaforte
Autore	Fumagalli P
Anno	1876
Formato	[sconosciuto]
Soggetto	Vista del giardino e del quadriportico di Villa Diomede
Bibliografia	www.pompei.sns.it



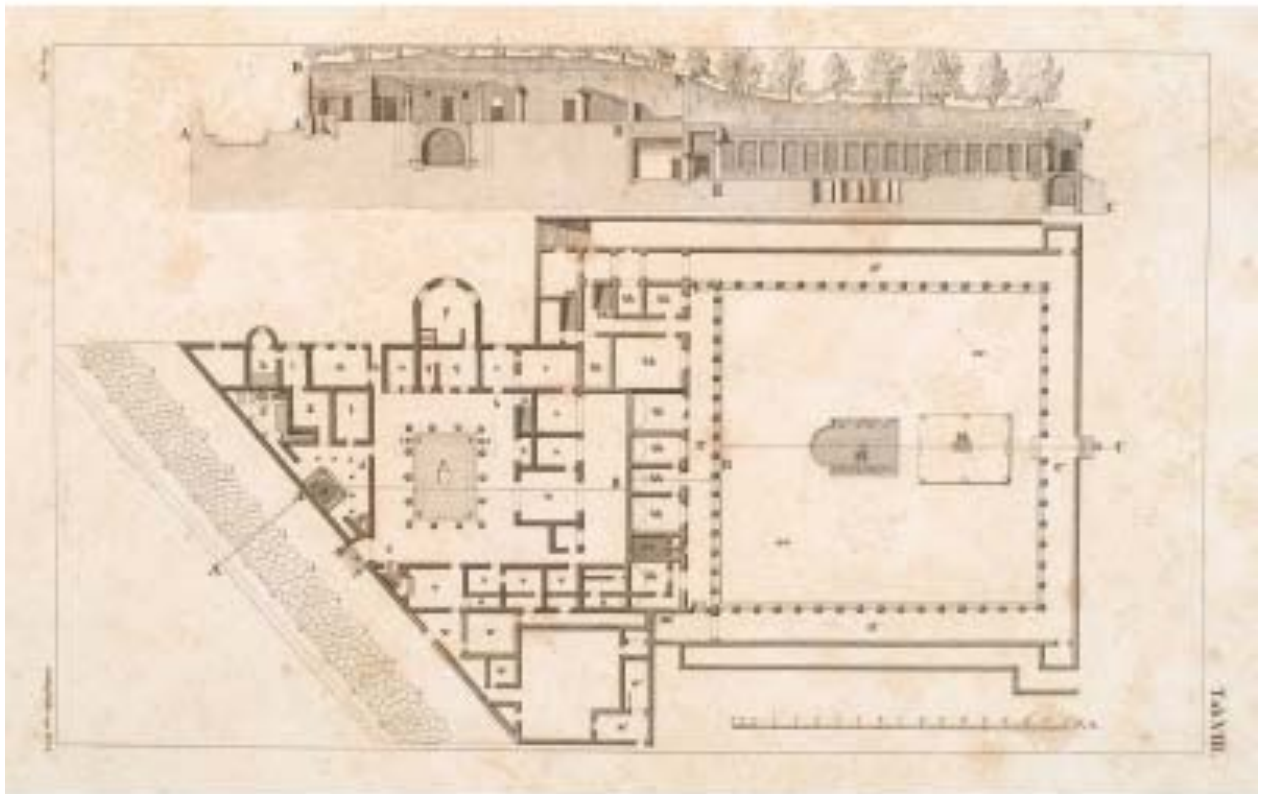
Fumagalli P., Pompeja. Traité pittoresque, historique et géométrique, Firenze, circa 1876 (incisione acquaforte)

Scheda n° 8
<i>Titolo</i> Vue de l'Entrée de la Maison de Diomedes à Pompeia
<i>Tecnica</i> incisione, acquaforte
<i>Autore</i> Fumagalli P
<i>Anno</i> 1876
<i>Formato</i> [sconosciuto]
<i>Soggetto</i> Vista dell'ingresso di Villa Diomede su Via delle Tombe
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



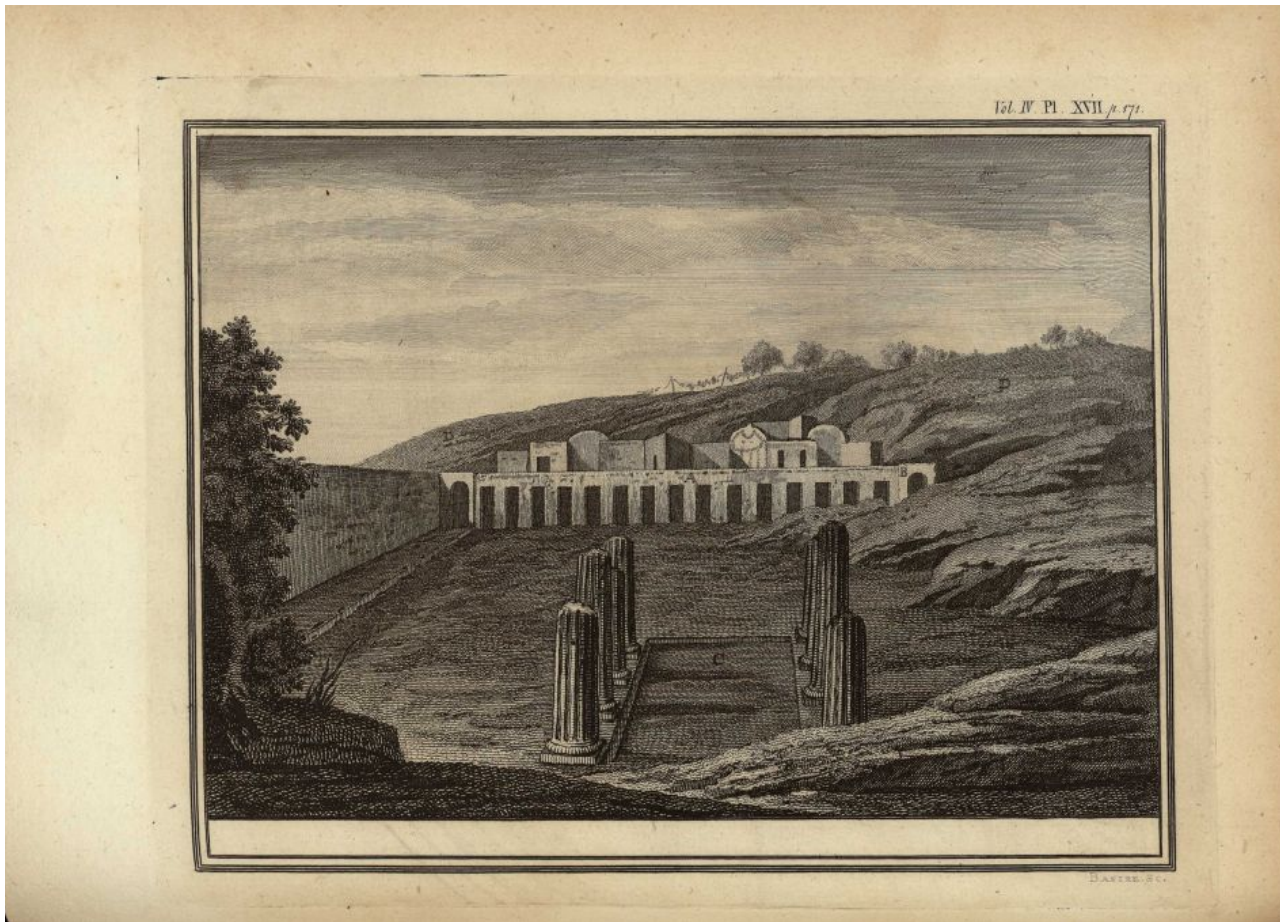
Fumagalli P., Pompeja. Traité pittoresque, historique et géométrique, Firenze, circa 1876 (incisione di Paolo Fumagalli, acquaforte)

Scheda n° 9
<i>Titolo</i> [Pianta e sezione longitudinale di Villa Diomede]
Tecnica incisione, acquaforte
Autore Goro Von Agyagfalva L.
Anno 1825
Formato 310x225 mm
Soggetto Pianta e sezione longitudinale di Villa Diomede
Bibliografia www.pompei.sns.it



Goro Von Agyagfalva L., Wanderungen durch Pompeii, Vienna, 1825, Tav. VIII (disegnatore Ludwig Goro Von Agyagfalva incisore Schoenfelder incisione acquaforte mm 310x225)

Scheda n° 10
<i>Titolo</i> [Villa Diomede durante gli scavi]
<i>Tecnica</i> incisione, acquaforte
<i>Autore</i> Hamilton W.
<i>Anno</i> 1777
<i>Formato</i> [sconosciuto]
<i>Soggetto</i> Vista del giardino di Villa Diomede durante gli scavi
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



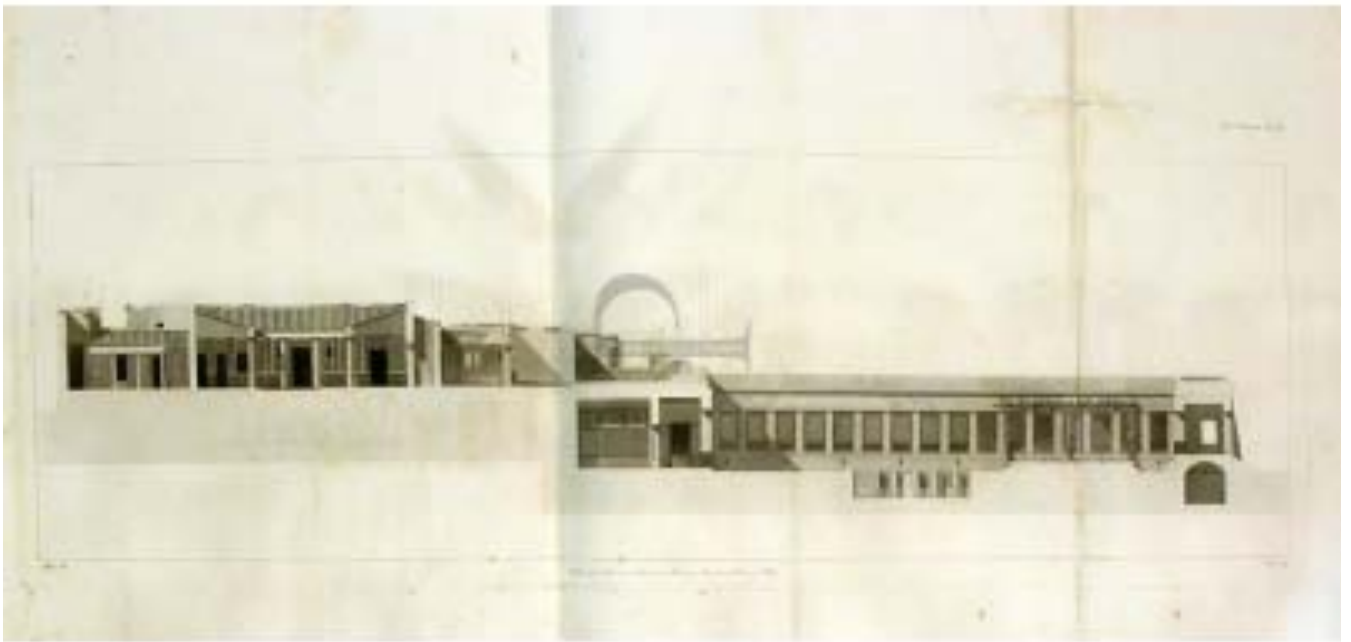
Hamilton W., Account of the Discoveries at Pompeii communicated by Sir William Hamilton, Londra, 1777, Tav. 17 (incisione di James Basire, acquaforte)

Scheda n° 11
<i>Titolo</i> Vue de la maison de campagne prise du côté du jardin
<i>Tecnica</i> incisione, acquaforte
<i>Autore</i> Mazois F.
<i>Anno</i> 1812 - 1838
<i>Formato</i> 267x429 mm
<i>Soggetto</i> Vista di Villa Diomede dal lato del giardino
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



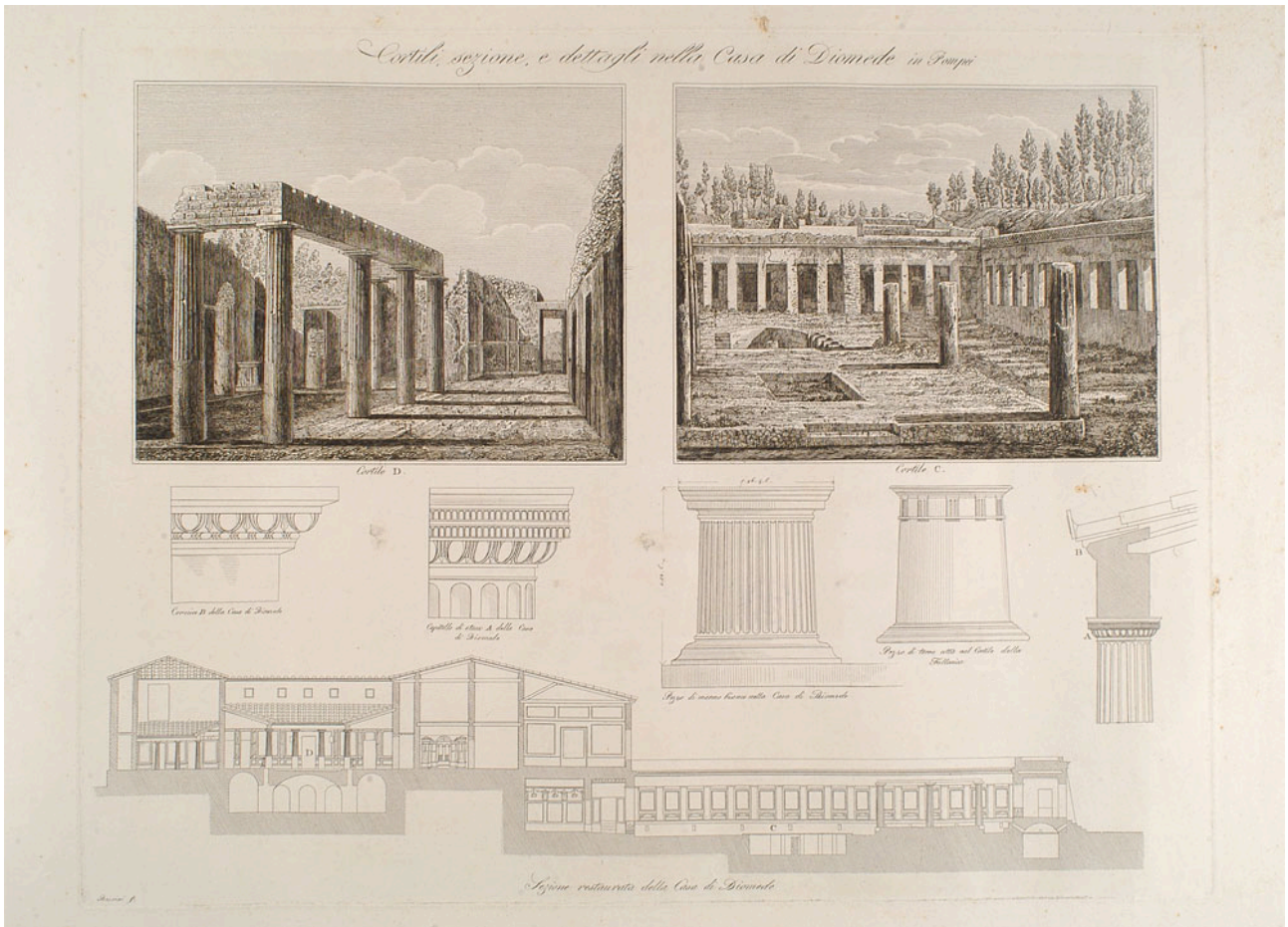
Mazois F., Les Ruines de Pompéi, dessinées et mesurées par F. Mazois, pendant les années MDCCCIX, MDCCCX, MDCCCXI... (ouvrage continué par M. Gau), Parigi, 1812 - 1838, vol. II, T

Scheda n° 12	
<i>Titolo</i>	<i>[Sezione longitudinale di Villa Diomede]</i>
Tecnica	incisione
Autore	Mazois F.
Anno	1812 - 1838
Formato	320x429 mm
Soggetto	Sezione longitudinale di Villa Diomede
Bibliografia	www.pompei.sns.it



Mazois F., Les Ruines de Pompéi, dessinées et mesurées par F. Mazois, pendant les années MDCCCIX, MDCCCX, MDCCCXI... (ouvrage continué par M. Gau), Parigi, 1812 - 1838, vol. II, Tav. XLVIII

Scheda n° 13
<i>Titolo</i> Cortili, sezione e dettagli nella Casa di Diomede in Pompei
<i>Tecnica</i> Incisione, acquaforte, mezzatinta
<i>Autore</i> Rossini L.
<i>Anno</i> 1831
<i>Formato</i> 410x503 mm
<i>Soggetto</i> Vista del peristilio e del giardino di Villa Diomede; sezione longitudinale
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



Rossini L., *Le Antichità di Pompei delineate sulle scoperte fatte sino a tutto l'anno MDCCCXXX...*, Roma, circa 1831, c. XV

Scheda n° 14

Titolo

Vue de la petite Cour supérieure de la Maison de Campagne de Pompeii.

Vue de la Partie inférieure ou du Rez de Chaussée d'une Maison de Campagne découverte près de Pompeii.

Tecnica

Incisione, acquaforte, mezzatinta

Autore

Saint Non (abbé de) J.

Anno

1782

Formato

370x241 mm

Soggetto

Vista del peristilio e del giardino di Villa Diomede

Bibliografia

www.pompei.sns.it



Scheda n° 15

Titolo

Vue d'une Maison de Campagne située près de l'ancienne Ville de Pompéii: Rétablie et dessinée d'après sa forme actuelle et une partie des Colonnes encore existantes, ainsi qu'on présume qu'elle pouvoit être lors de sa destruction par la fameuse eruption de Vesuve arrivée le 24. Aout 79.

Tecnica

Incisione, acquaforte, mezzatinta

Autore

Saint Non (abbé de) J.

Anno

1782

Formato

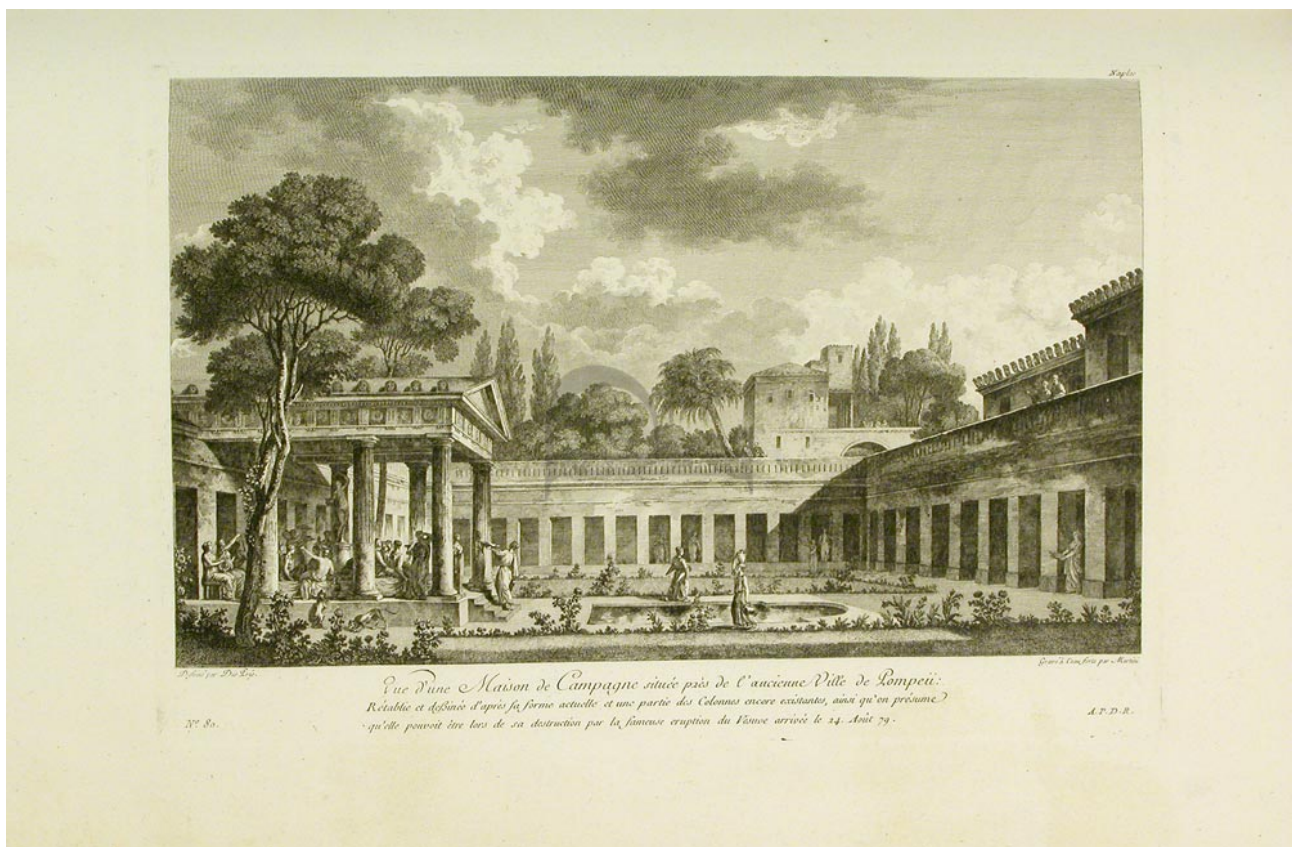
237x348 mm

Soggetto

Presunto aspetto del livello inferiore di Villa Diomede

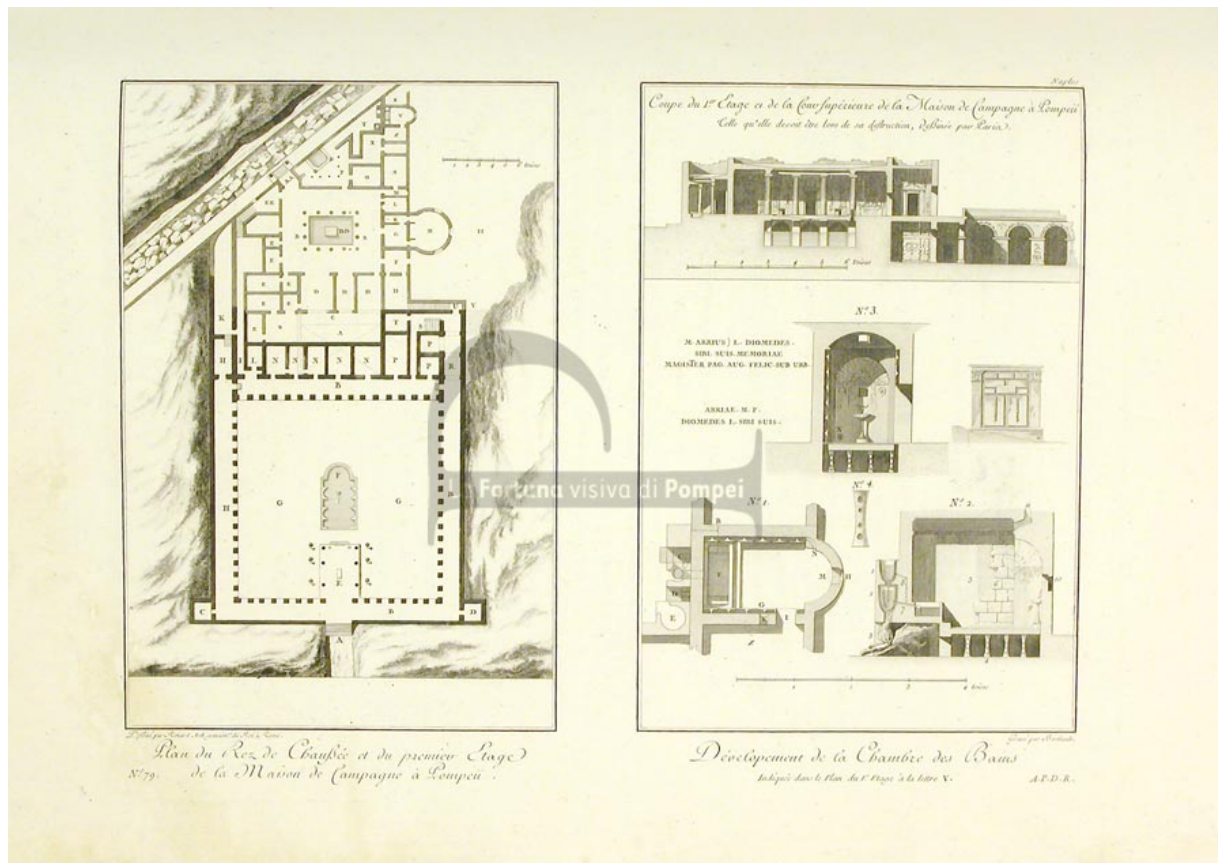
Bibliografia

www.pompei.sns.it



Saint Non (abbé de) J., Voyage pittoresque ou description des royaumes de Naples et de Sicile. Seconde partie du premier volume... Les Antiquités de Pompéii, Clousier, 1782, vol. I, Ta

Scheda n° 16
<i>Titolo</i> Plan du Rez de Chaussée et du premier Etage de la Maison de Campagne à Pompeii Développement de la Chambre des Bains indiquée dans le Plan du 1. re Etage à la lettre V
<i>Tecnica</i> Incisione, acquaforte
<i>Autore</i> Saint Non (abbé de) J.
<i>Anno</i> 1782
<i>Formato</i> 270x365 mm
<i>Soggetto</i> Pianta e sezione di Villa Diomede, dettaglio in pianta e in sezione del caldarium
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



Saint Non (abbé de) J., Voyage pittoresque ou description des royaumes de Naples et de Sicile. Seconde partie du premier volume... Les Antiquités de Pompéii, Clousier, 1782, vol. I, Tav.

Scheda n° 17

Titolo

Tecnica
Disegno, acquerello, matita, inchiostro

Autore
Wilkins H.

Anno
1819

Formato
250 x 344 mm

Soggetto
Giardino con piscina e triclinio estivo, circondato da un quadriportico

Bibliografia
www.pompei.sns.it



Scheda n° 18
<i>Titolo</i> Maison de Diomedé
<i>Tecnica</i> Incisione, acquaforte, mezzatinta
<i>Autore</i> Wilkins H.
<i>Anno</i> 1819
<i>Formato</i> 262 x 369 mm
<i>Soggetto</i> Giardino con piscina e triclinio estivo, circondato da un quadriportico
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



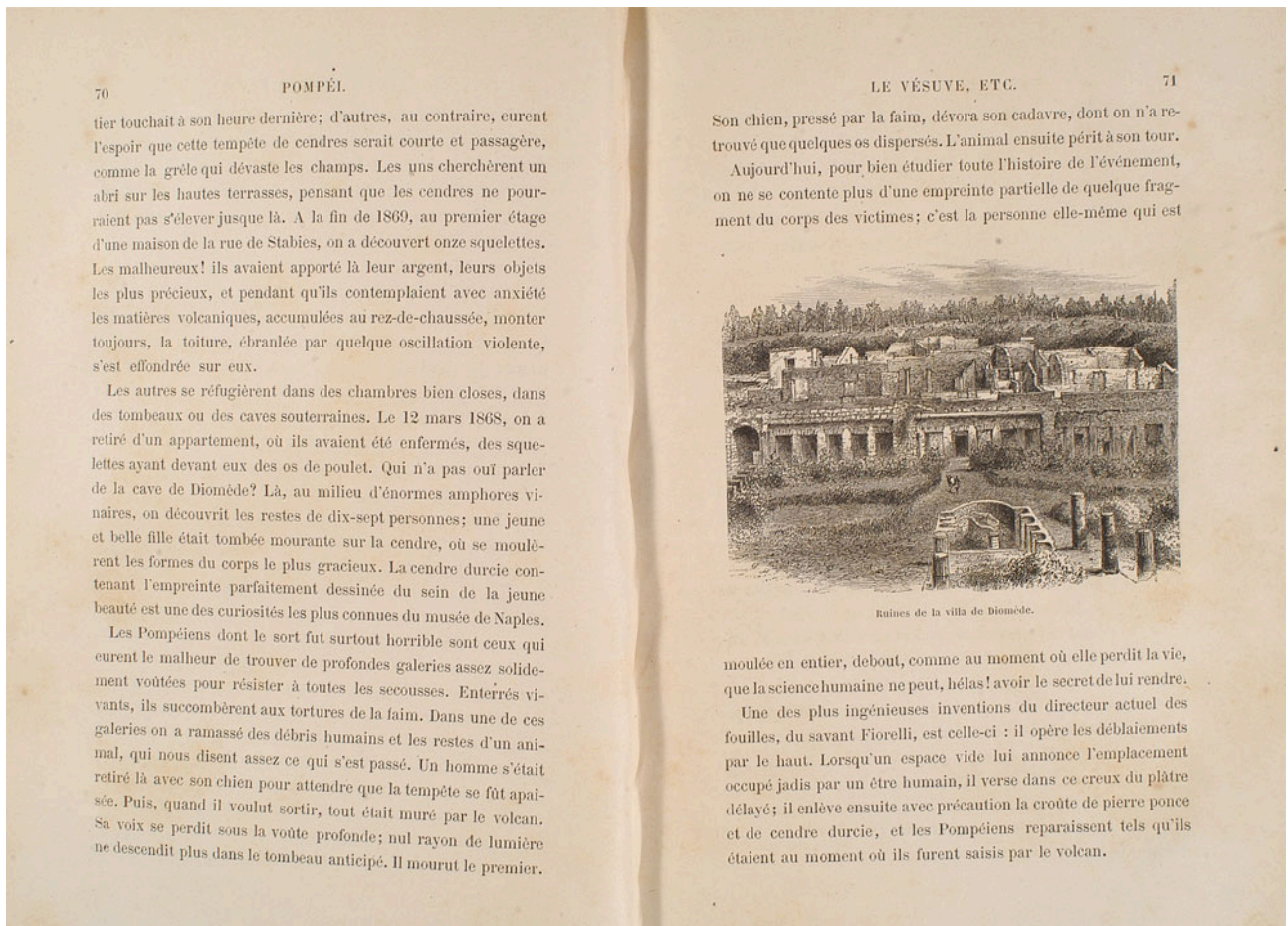
Scheda n° 19
<i>Titolo</i> View of the Villa of M. Arrius Diomedes. when first discovered.
<i>Tecnica</i> Incisione, xilografia
<i>Autore</i> Mazois F.
<i>Anno</i> 1868
<i>Formato</i> 123 x 202 mm
<i>Soggetto</i> Vista del livello inferiore di Villa Diomede
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it



Scheda n° 20
<i>Titolo</i> Portico of the House of Diomedes, with a view of the Atrium beyond.
<i>Tecnica</i> incisione xilografia
<i>Autore</i> Dyer T.
<i>Anno</i> 1868
<i>Formato</i> 200x120 mm
<i>Soggetto</i> Ingresso principale di Villa Diomede, dal quale si intravede il peristilio
<i>Bibliografia</i> www.pompei.sns.it

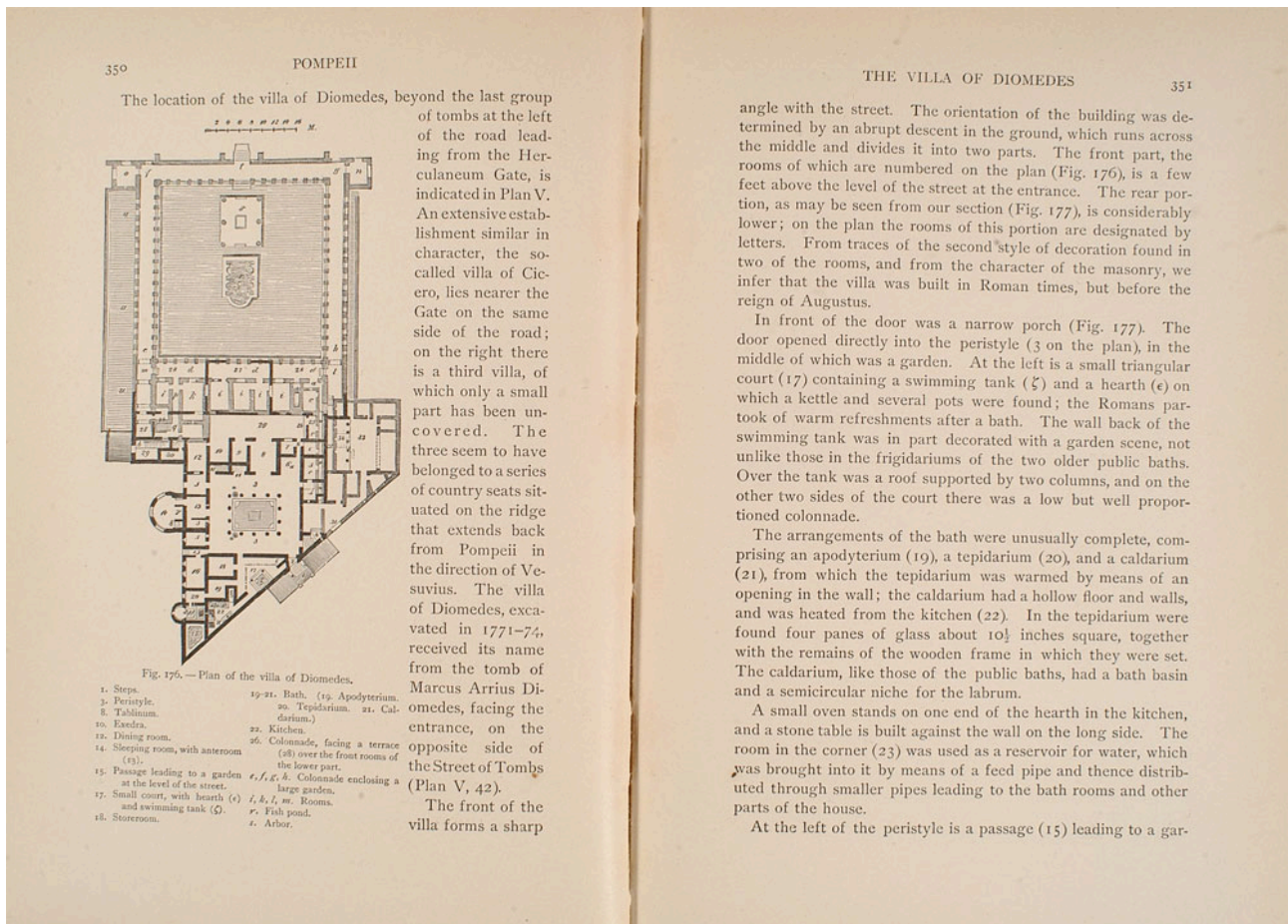


Scheda n° 21
<i>Titolo</i> Ruines de la villa de Diomedé.
Tecnica incisione
Autore Lagrèze (de) M.
Anno 1889
Formato 257x160 mm
Soggetto Vista di Villa Diomedé dal giardino
Bibliografia www.pompei.sns.it



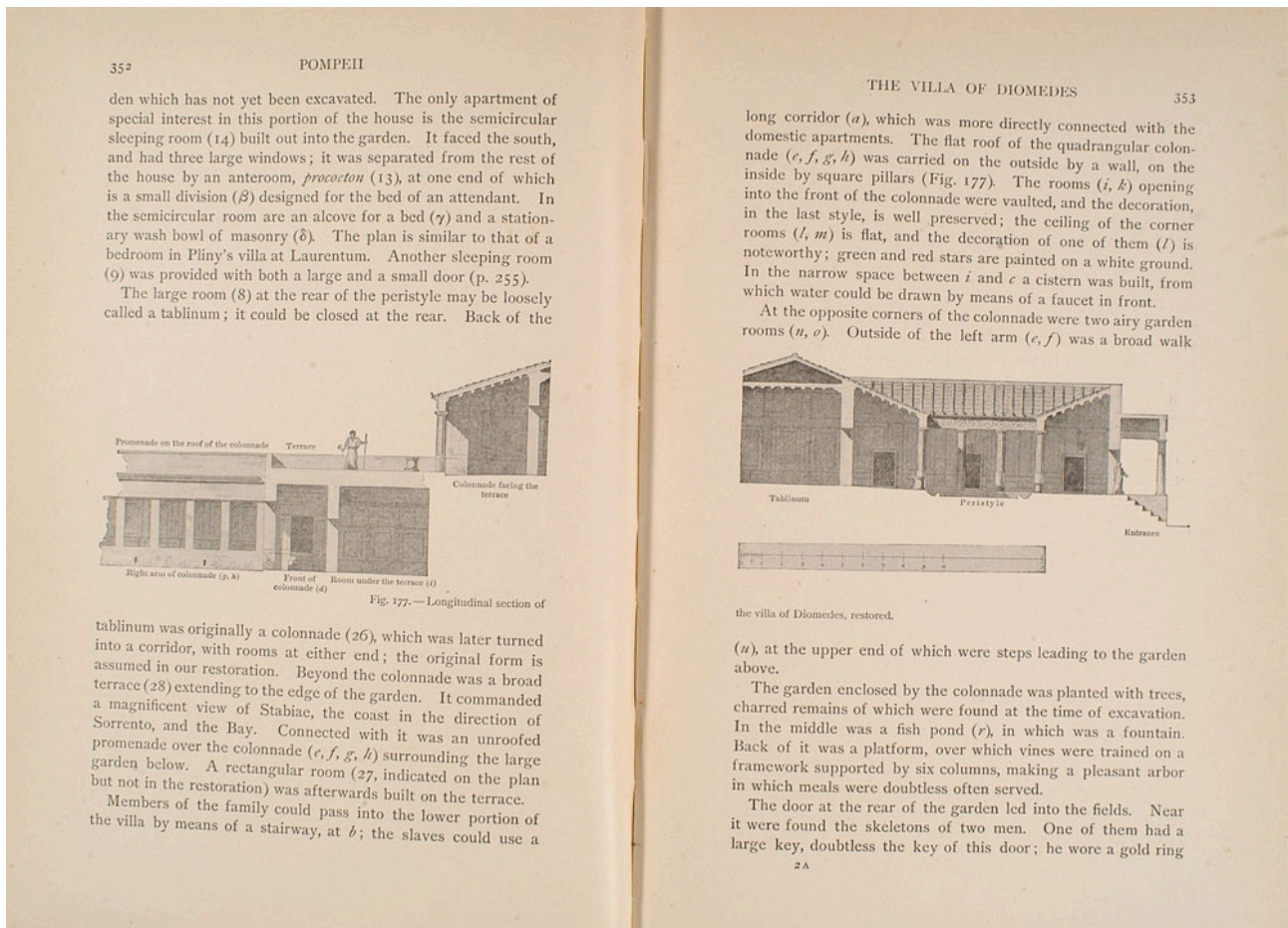
Lagrèze (de) M., Pompei, les catacombes, l'Alhambra, Parigi, 1889, P. 71 (incisione mm257x1609)

Scheda n° 22
Titolo Plan of the villa of Diomedes
Tecnica Incisione, acquaforte
Autore Mau A.
Anno 1899
Formato 225x150 mm
Soggetto Pianta di Villa Diomede, nella legenda è espressa la funzione dei diversi ambienti
Bibliografia www.pompei.sns.it



Mau A., Pompeii. Its Life and Art, New York, 1899, P. 350 (incisione,acquaforte mm 225x150)

Scheda n° 23
Titolo the villa of Diomedes, restored.
Tecnica Incisione, litografia
Autore Mau A.
Anno 1899
Formato 225x150 mm
Soggetto Sezioni longitudinale di Villa Diomede, rispettivamente all'altezza della terrazza su giardino e in corrispondenza del peristilio
Bibliografia www.pompei.sns.it



Mau A., Pompeii. Its Life and Art, New York, 1899, P. 353 (incisione, litografia mm225x150)

Scheda n° 24
<i>Titolo</i> [Villa di Diomede]
Tecnica fotografia
Autore Rive R.
Anno 1868 o 1895
Formato [sconosciuto]
Soggetto Villa di Diomede fotografata dalla strada
Bibliografia www.pompeiiisites.org



Scheda n° 25

Titolo

In the centre would have been the large exedra

Tecnica
disegno

Autore
Niccolini F.

Anno
1862

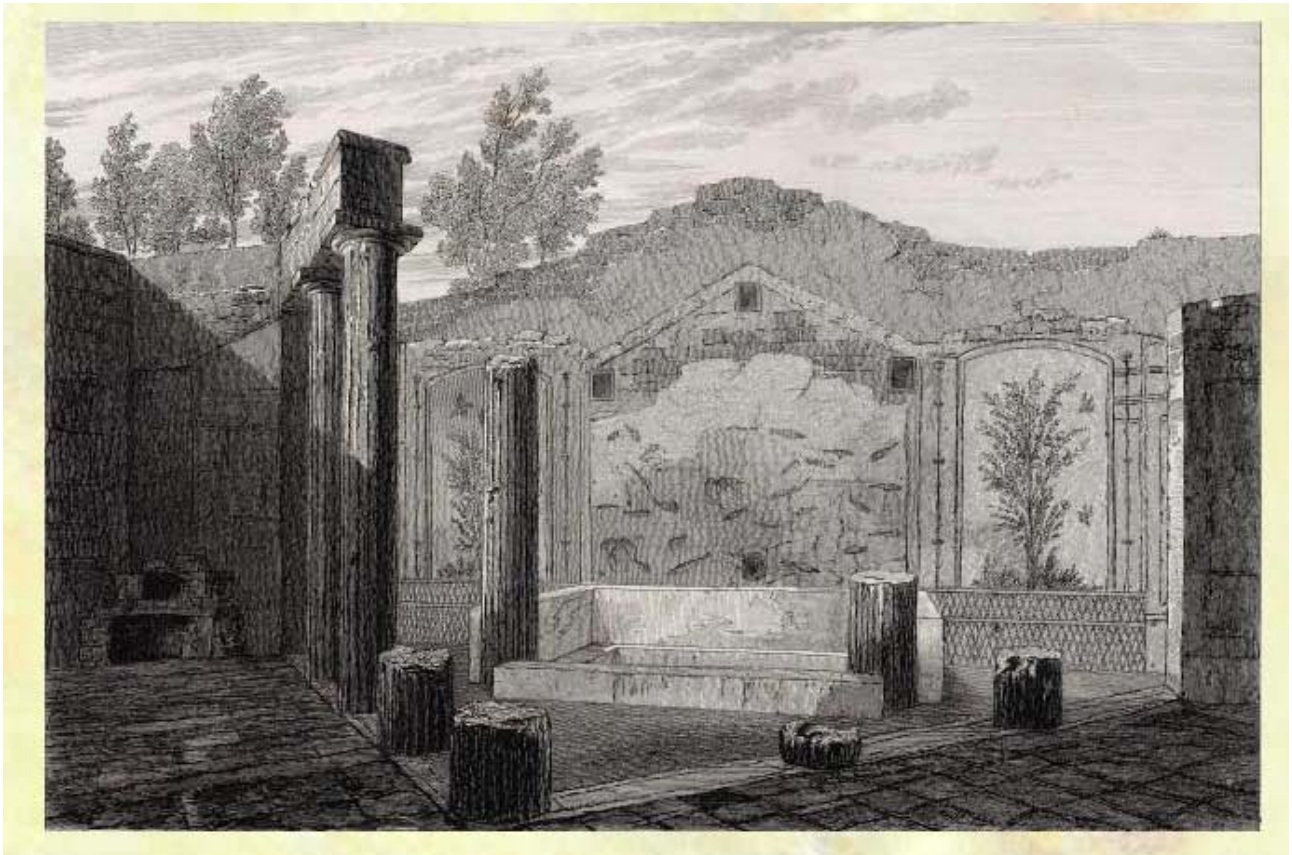
Formato
[sconosciuto]

Soggetto
Villa di Diomede

Bibliografia
www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 26
<i>Titolo</i> <i>Drawing of baths complex</i>
Tecnica disegno
Autore Cooke W. B.
Anno 1826
Formato [sconosciuto]
Soggetto Ambiente triangolare porticato e vasca del frigidarium
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 27

Titolo

Looking towards north wall across front peristyle

Tecnica

Fotografia (cartolina)

Autore

[sconosciuto]

Anno

[sconosciuto]

Formato

[sconosciuto]

Soggetto

Peristilio di Villa Diomede

Bibliografia

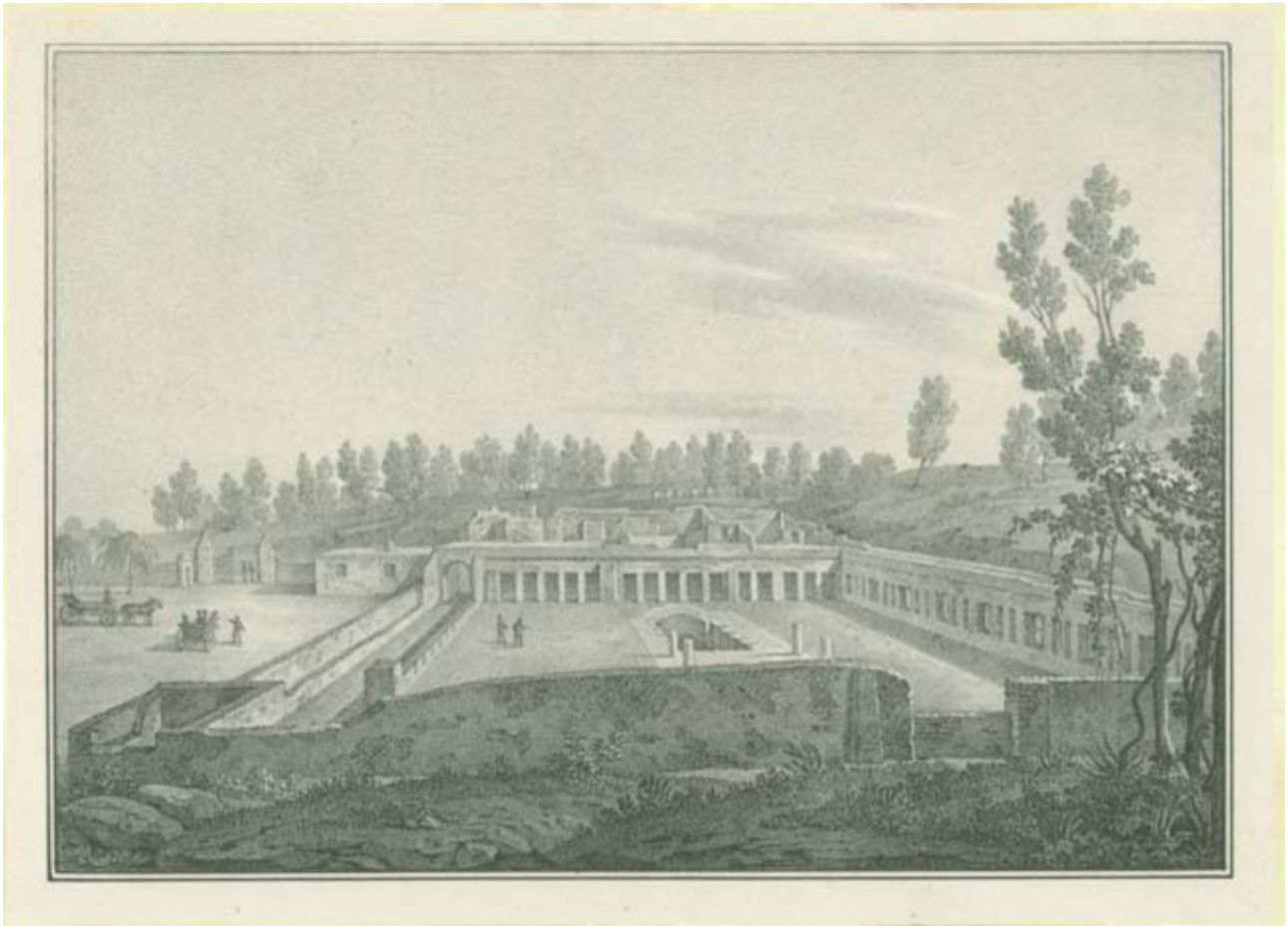
www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 28
<i>Titolo</i> <i>Looking north-east across garden towards east portico, from south-west corner</i>
Tecnica fotografia
Autore [sconosciuto]
Anno 1870
Formato [sconosciuto]
Soggetto Giardino e portico orientale di Villa Diomede
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 29
<i>Titolo</i> <i>Looking east from rear wall of garden</i>
Tecnica disegno
Autore [sconosciuto]
Anno 1840
Formato [sconosciuto]
Soggetto Giardino e quadriportico di Villa Diomede
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 30
<i>Titolo</i> Looking east over garden across pergola supported by six columns
Tecnica Fotografia (cartolina)
Autore Maiuri A.
Anno XIX secolo
Formato [sconosciuto]
Soggetto Giardino e quadriportico di Villa Diomede
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 31

Titolo

Looking east across garden to villa

Tecnica
Fotografia

Autore
Sommer and Behles

Anno
Tra il 1867 e il 1874

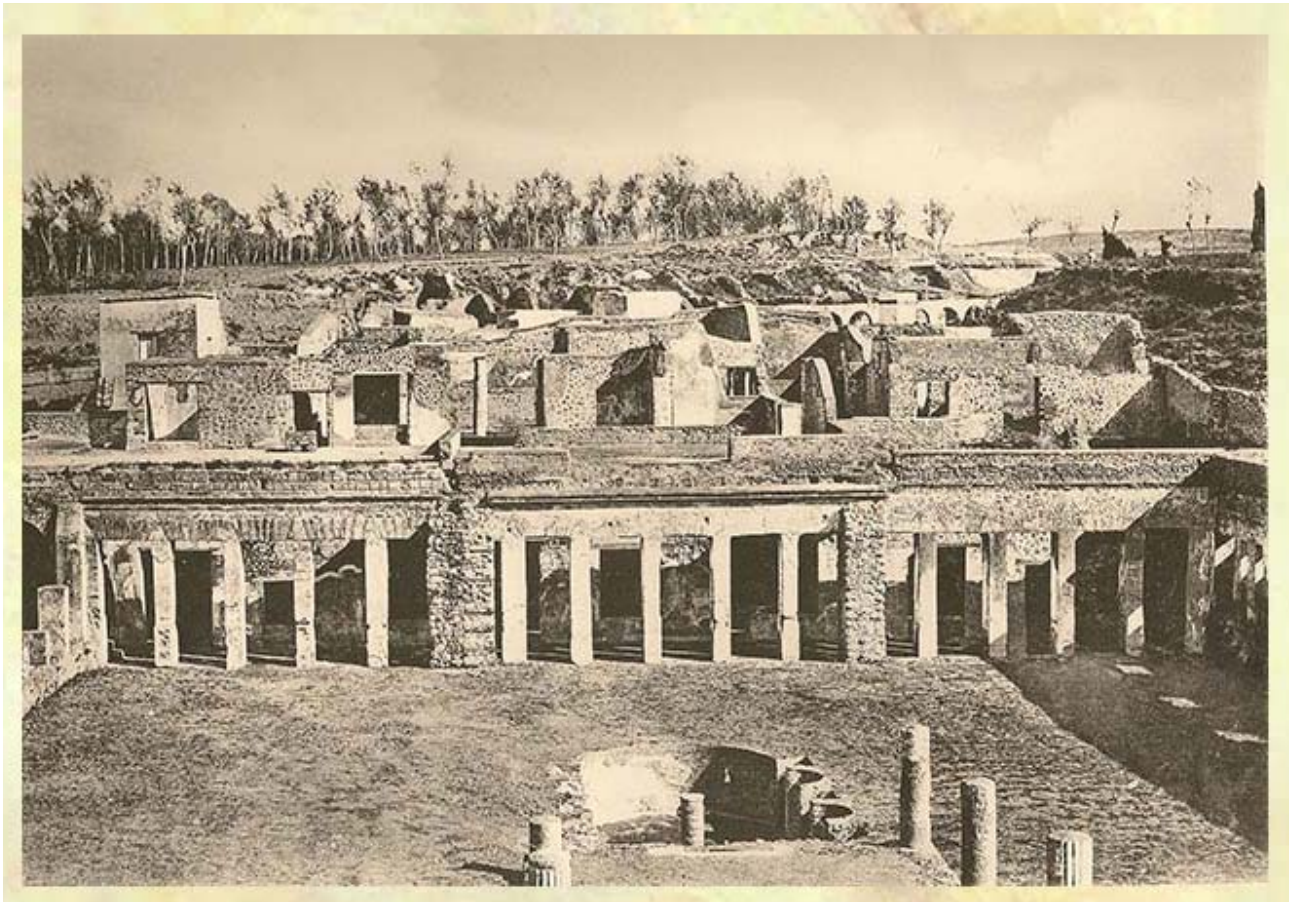
Formato
[sconosciuto]

Soggetto
Giardino di Villa Diomede

Bibliografia
www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 32
<i>Titolo</i> <i>Looking east across garden to villa</i>
Tecnica Fotografia
Autore [sconosciuto]
Anno XIX secolo
Formato [sconosciuto]
Soggetto Giardino e quadriportico di Villa Diomede
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



Scheda n° 33
<i>Titolo</i> Casa di Diomede, Pompei
Tecnica Fotografia
Autore Sommer G.
Anno 1870
Formato [sconosciuto]
Soggetto Giardino e quadriportico di Villa Diomede
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



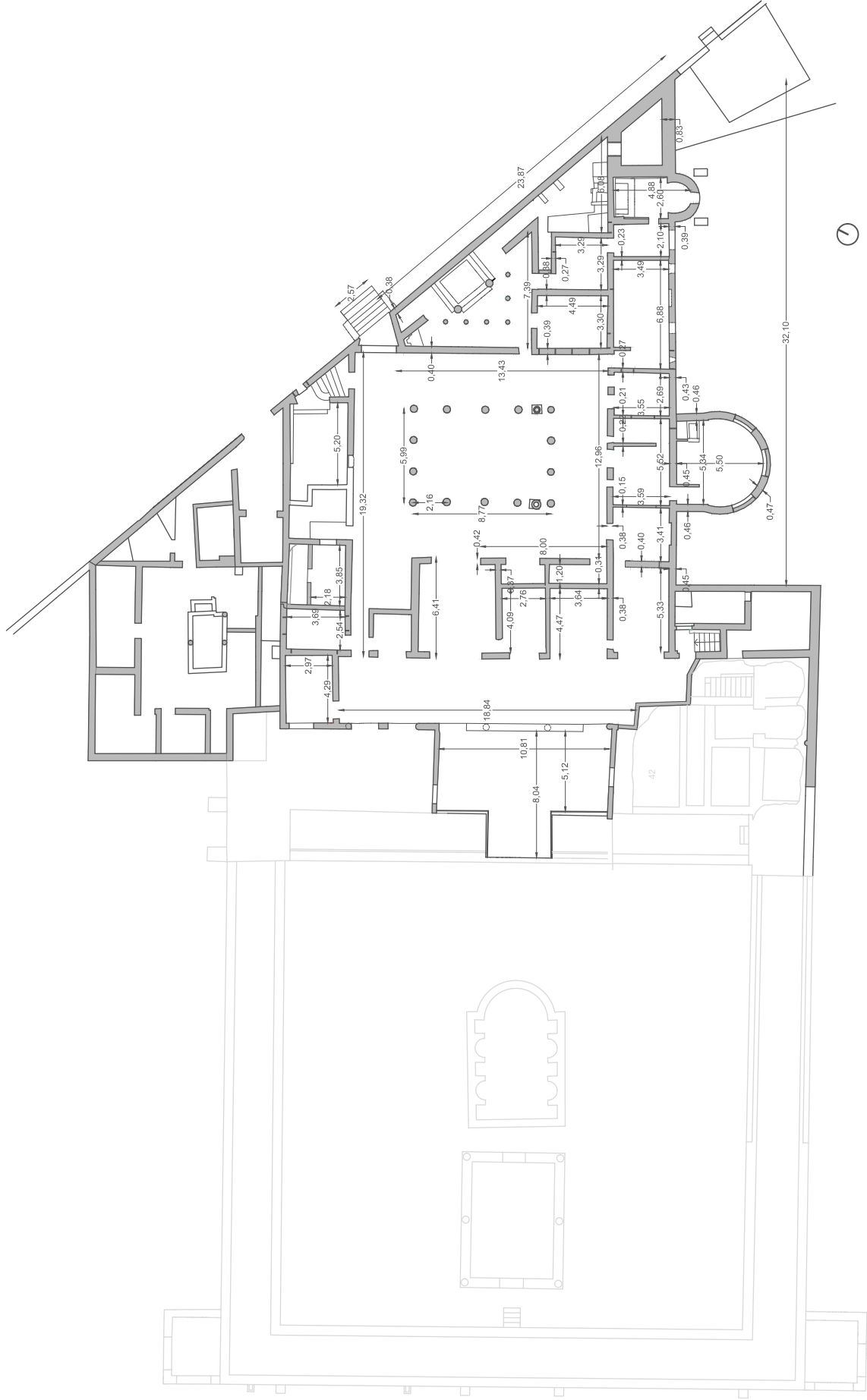
5320 Casa di Diomede. Pompei

G. Sommer - Napoli

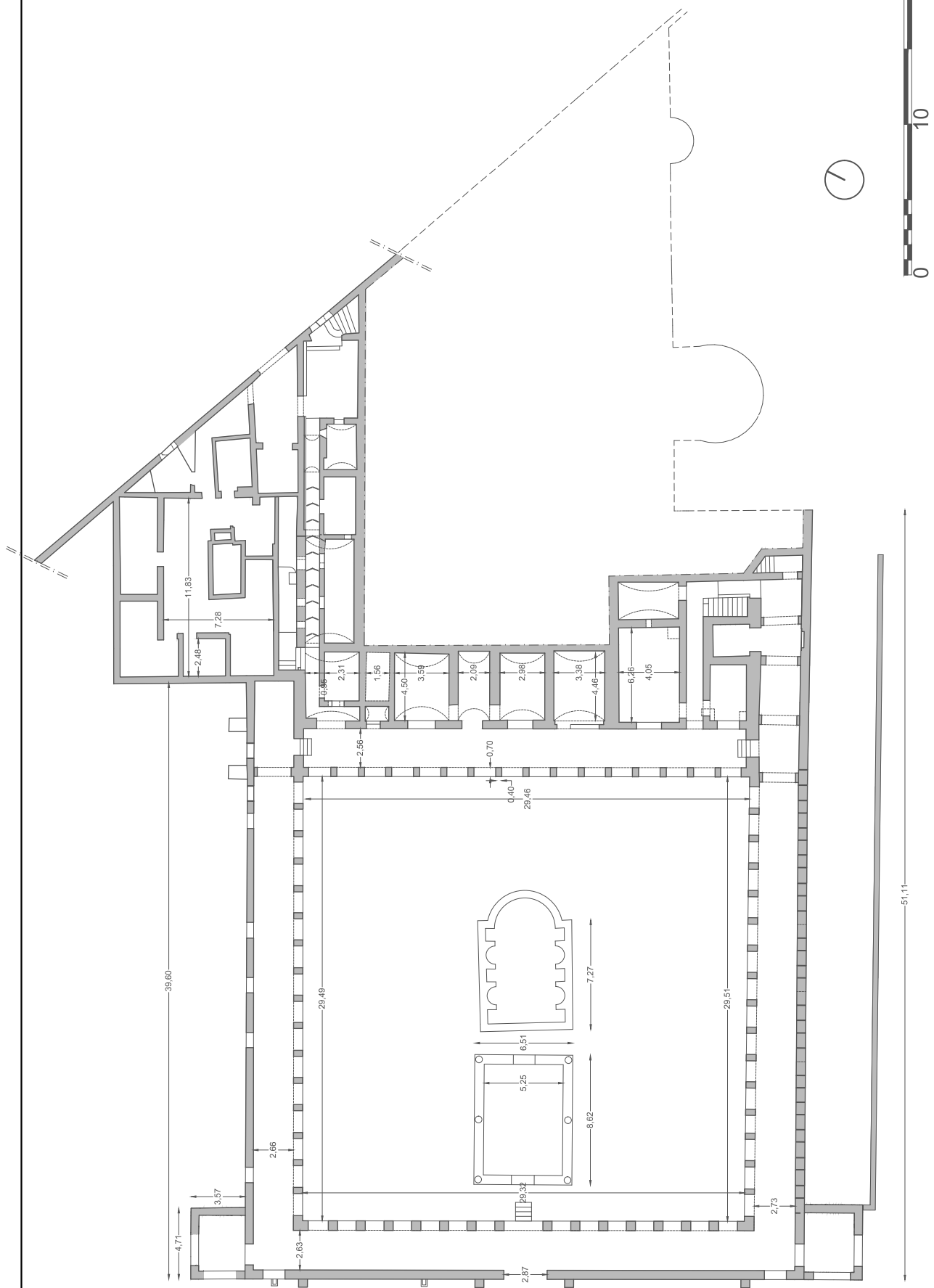
Scheda n° 34
<i>Titolo</i> <i>Looking south-east from the north-west turret</i>
Tecnica Fotografia
Autore [sconosciuto]
Anno 1915
Formato [sconosciuto]
Soggetto Quadriportico di Villa Diomede
Bibliografia www.pompeiiinpictures.com



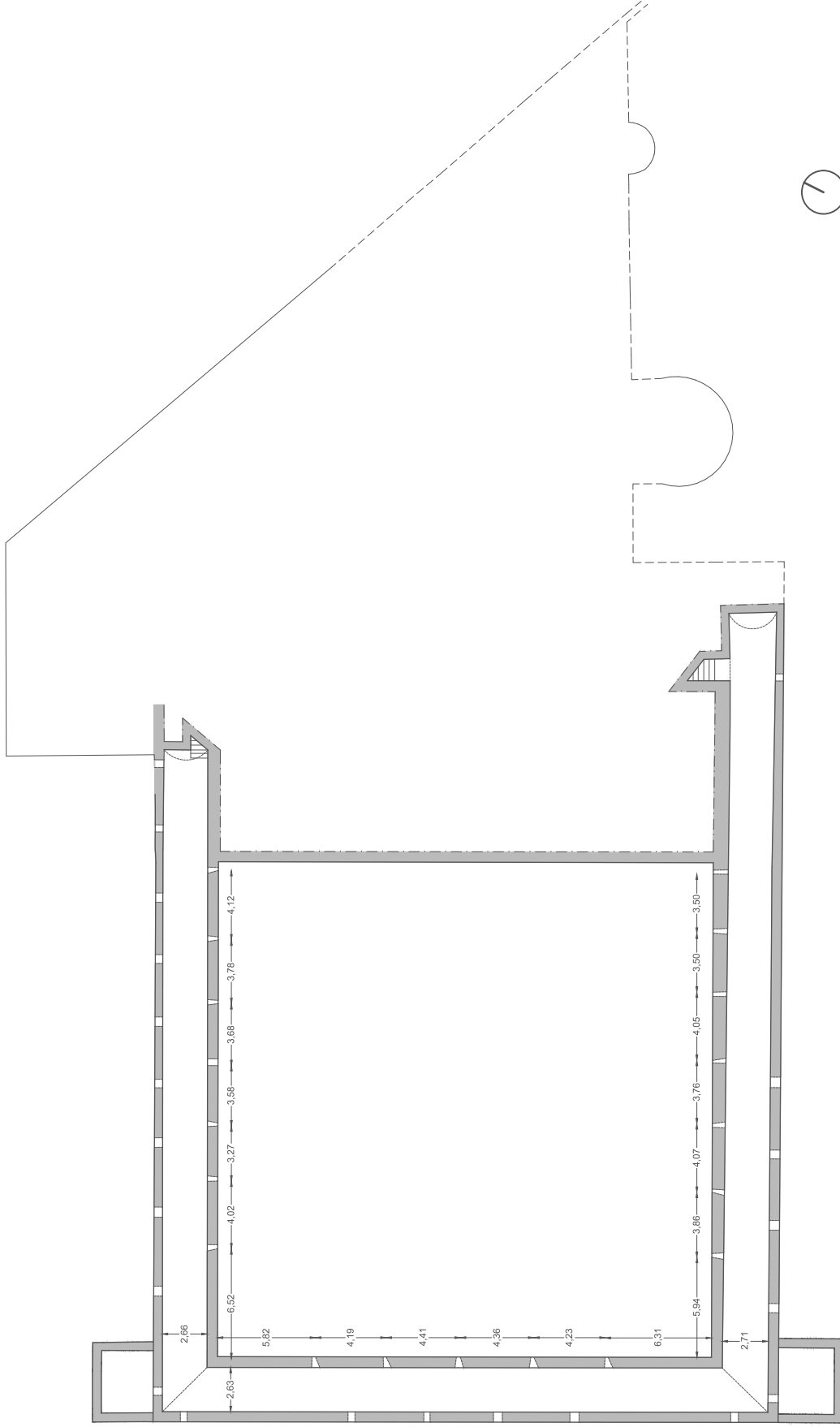
Allegato B.1
Rilievo geometrico



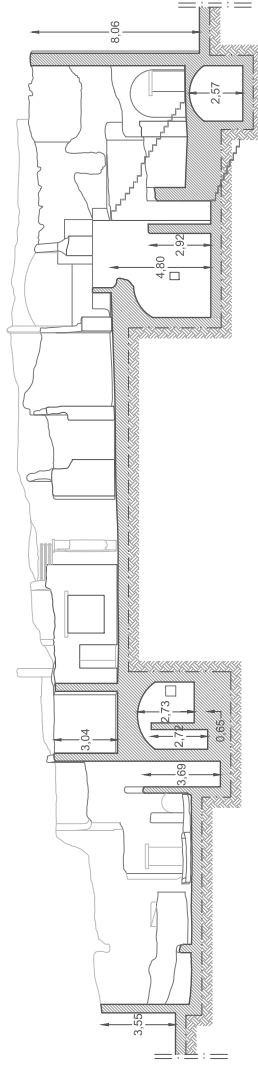
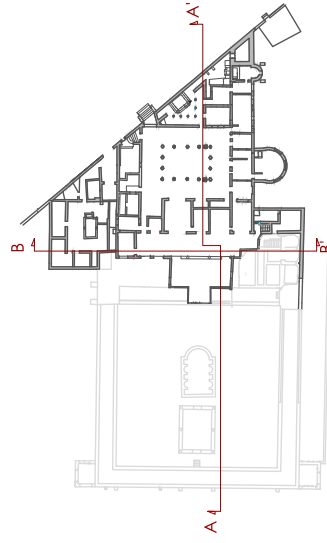
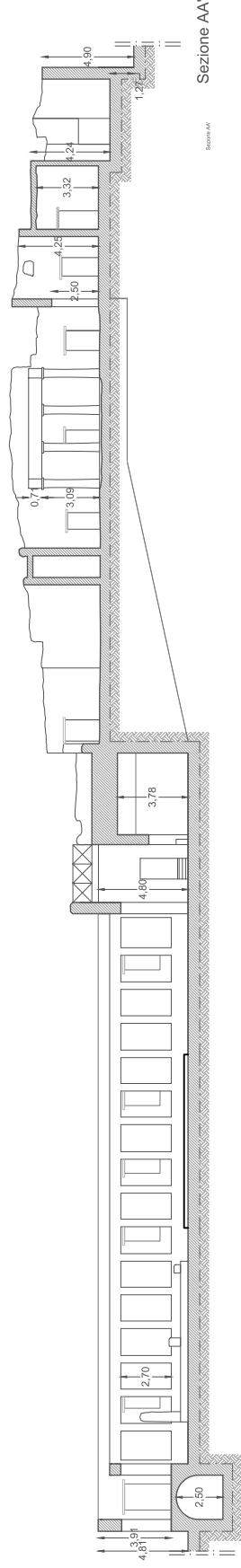
Villa Diomede
B.1.01
RILIEVO GEOMETRICO
 Piano Terra
 scala 1:100



Villa Diomede
B.1.02
RILIEVO GEOMETRICO
 Livello del giardino
 scala 1:100



Villa Diomede **B.1.03**
RILIEVO GEOMETRICO scala 1:100
 Livello del criptoportico



Villa Diomede

B.1.04

RILIEVO GEOMETRICO

scala 1:100

Sezione longitudinale e trasversale

Allegato B.2
Rilievo Fotografico



1



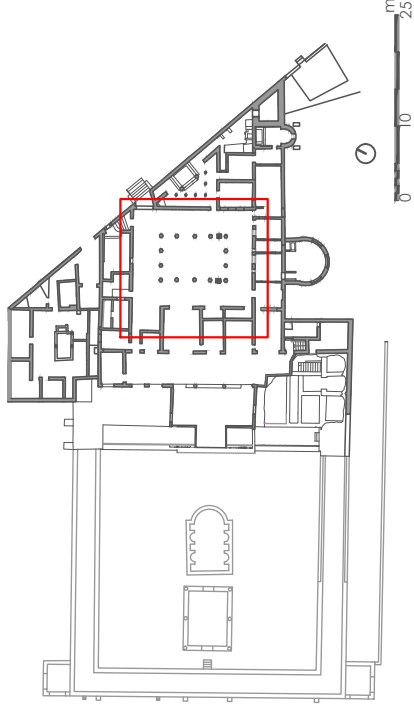
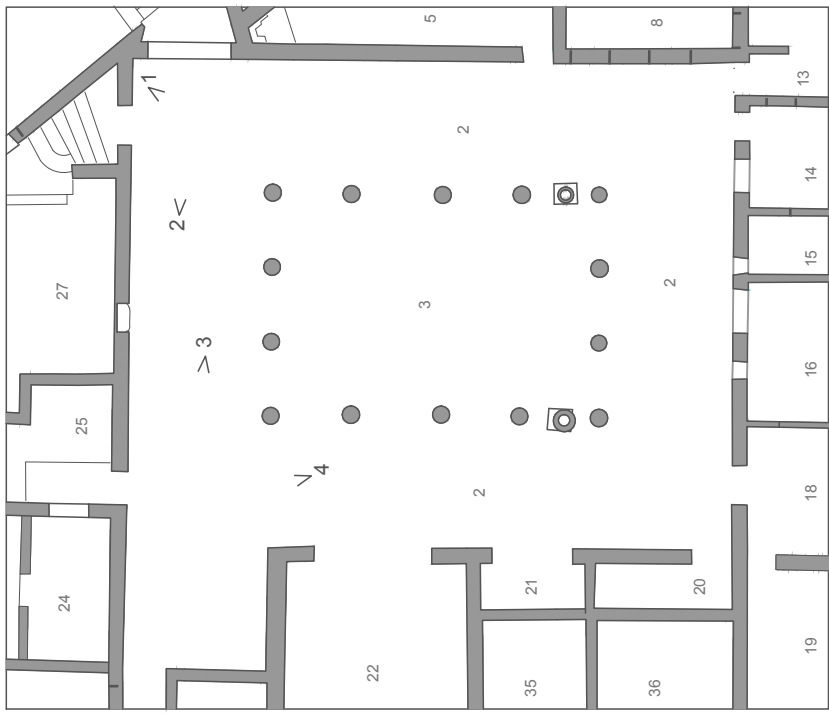
2



3



4



0 10 25
M

Villa Diomede
B.2.01
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
 PERISTILIO



5



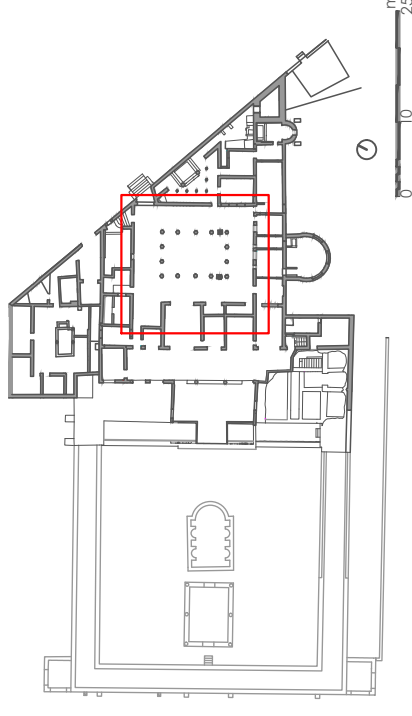
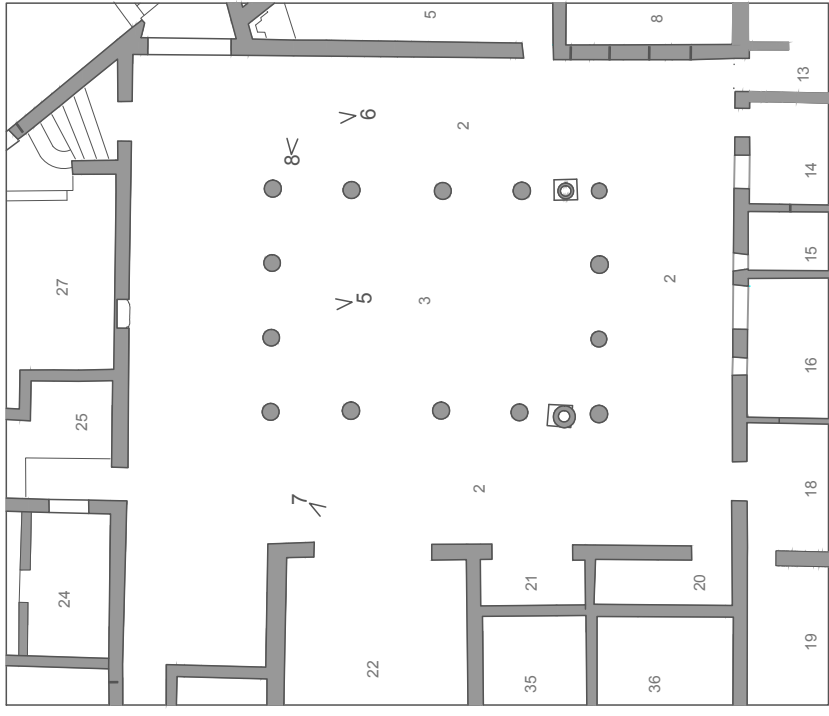
6



7



8



Villa Diomede

B.2.02

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

PERISTILIO



9



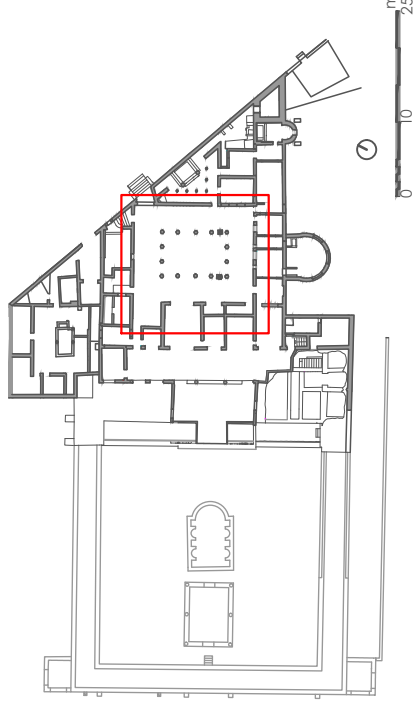
10



12



11



0 10 25
m

B.2.03

Villa Diomede

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

PERISTILIO

Piano terra



14



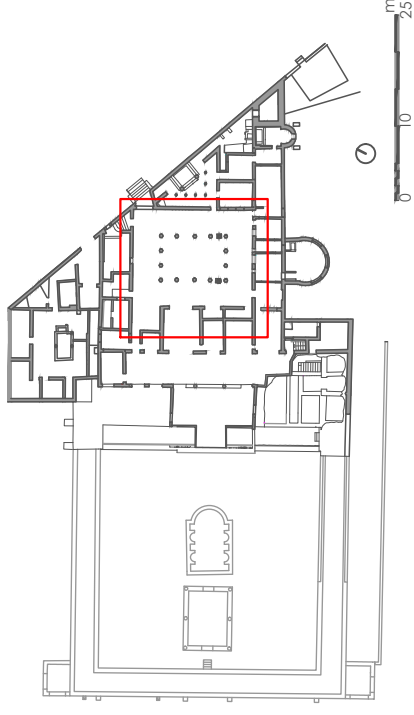
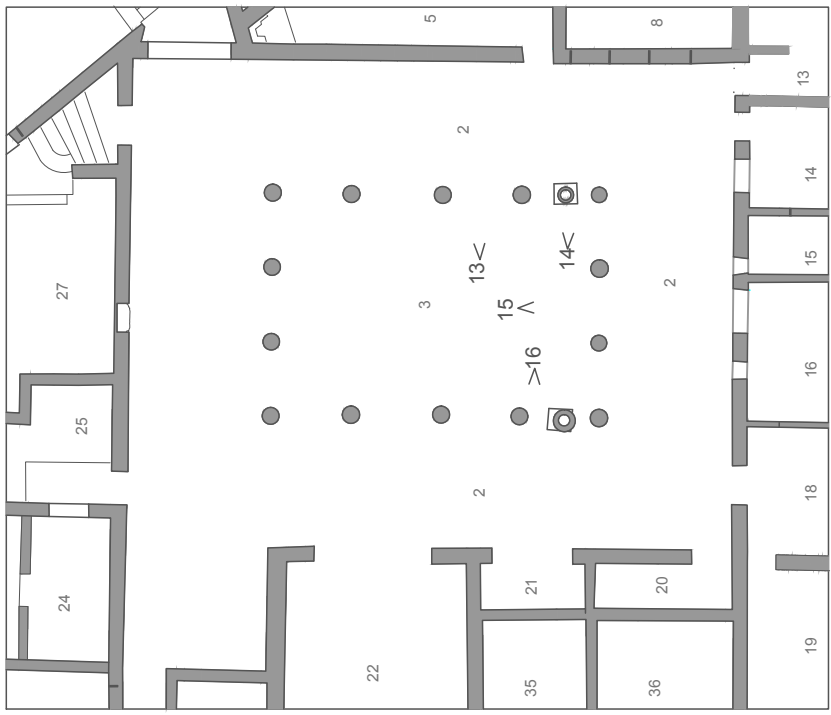
16



13



15



Villa Diomede

B.2.04

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

PERISTILIO



17



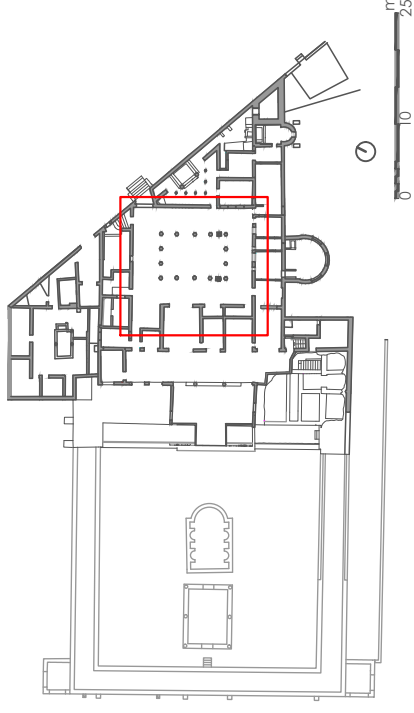
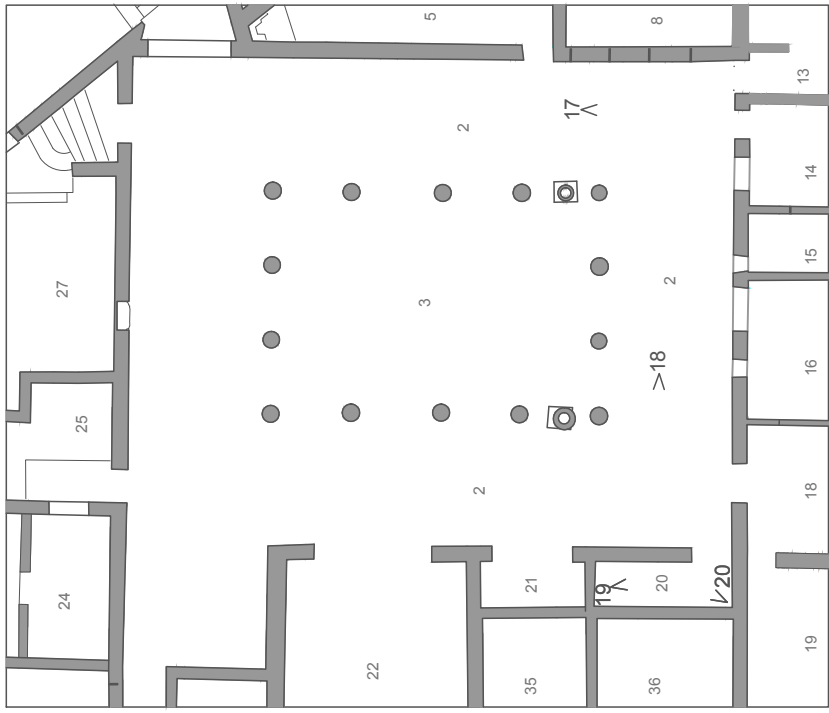
19



18



20



Villa Diomede
B.2.05
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
 PERISTILIO



100



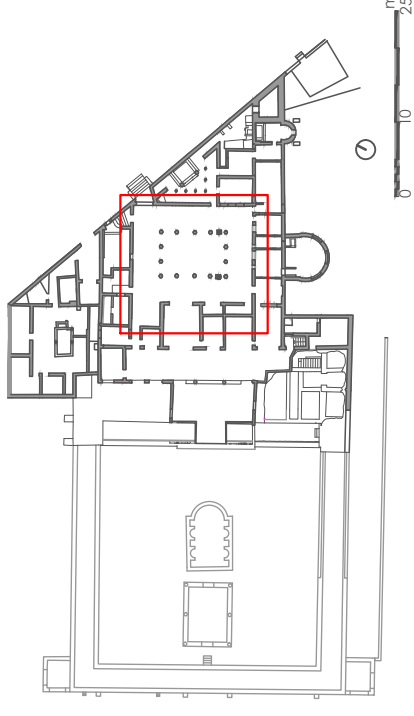
102



103



134



Villa Diomede

B.2.06

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

PERISTILIO



23



22



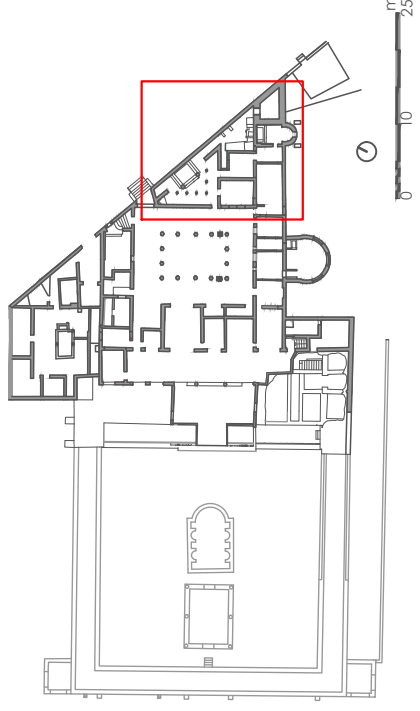
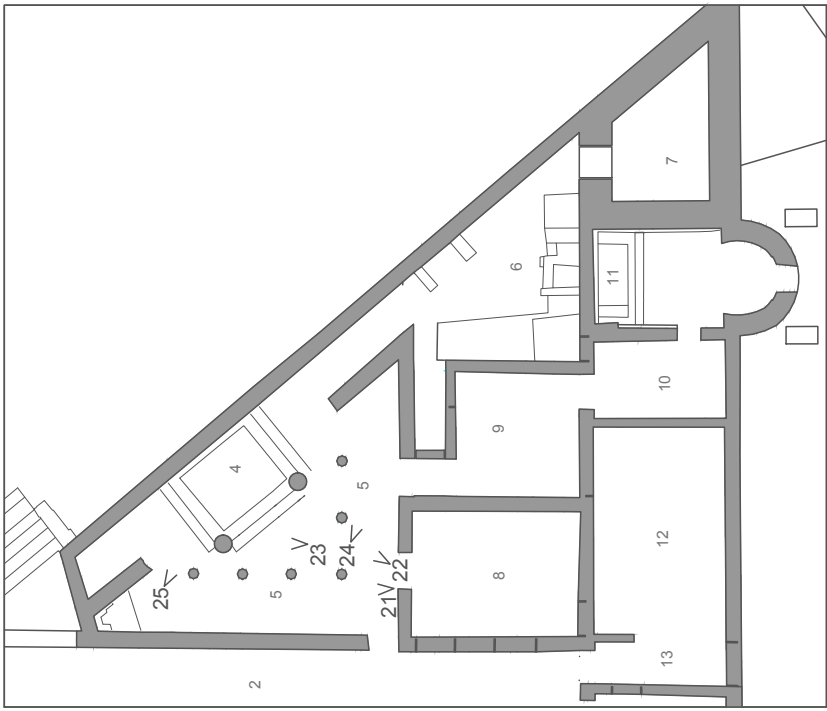
21



25



24



Villa Diomede

B.2.07

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 4-5-6



27



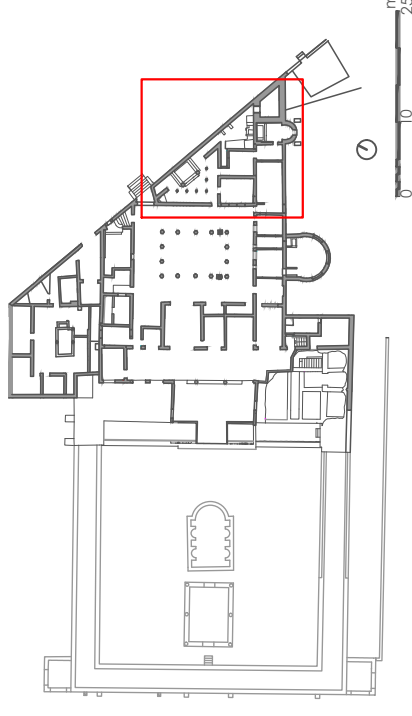
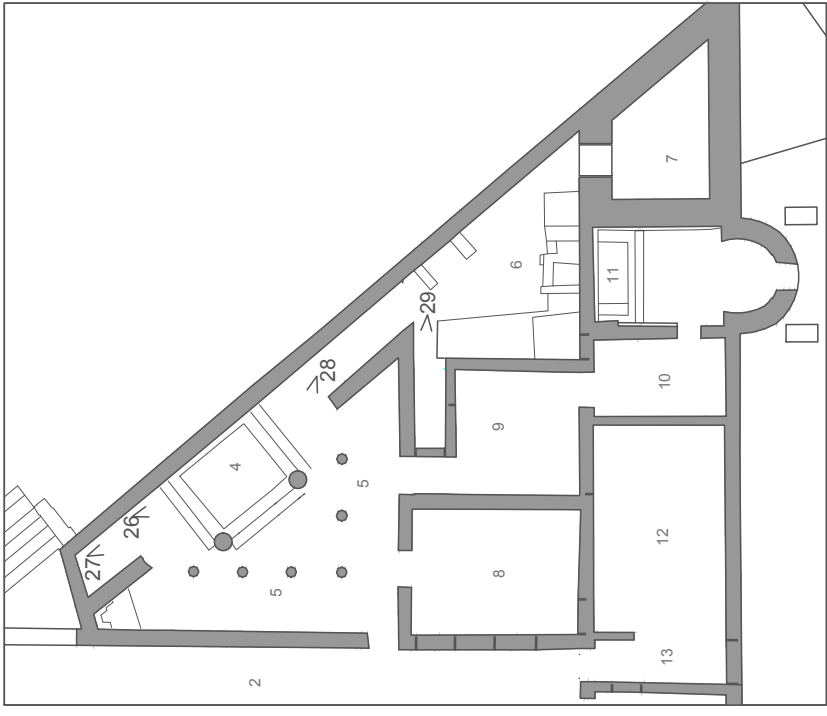
26



29



28



0 10 25
m

Villa Diomede

B.2.08

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 4-5-6



32



31



30



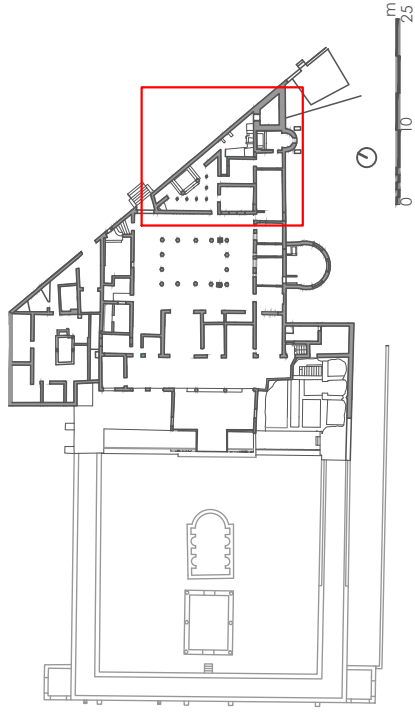
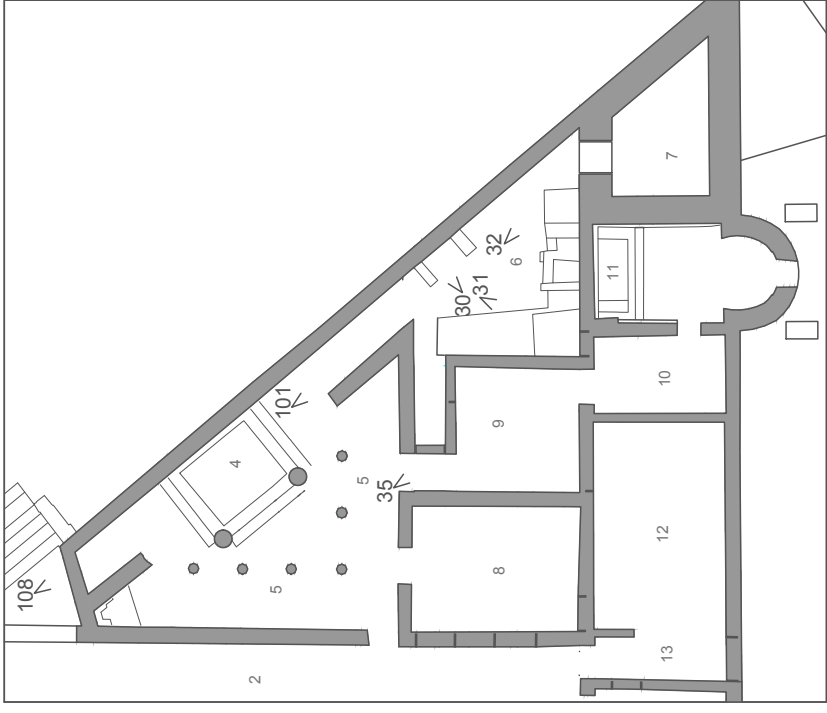
108



101



35



Villa Diomede

B.2.09

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 4-5-6



105



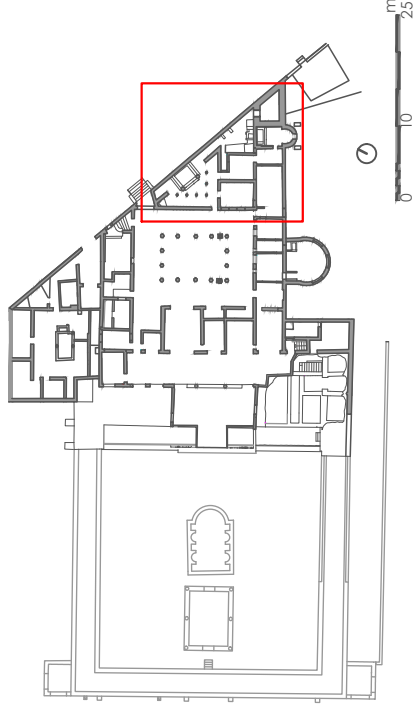
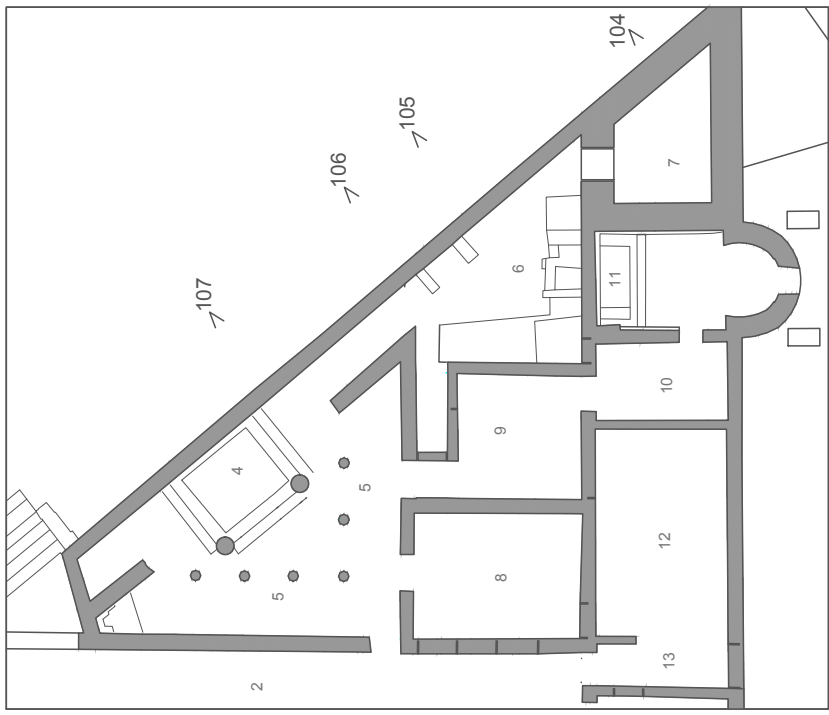
104



107



106



Villa Diomede

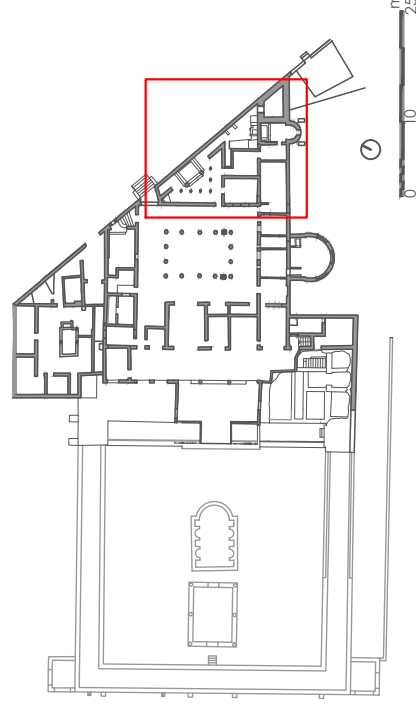
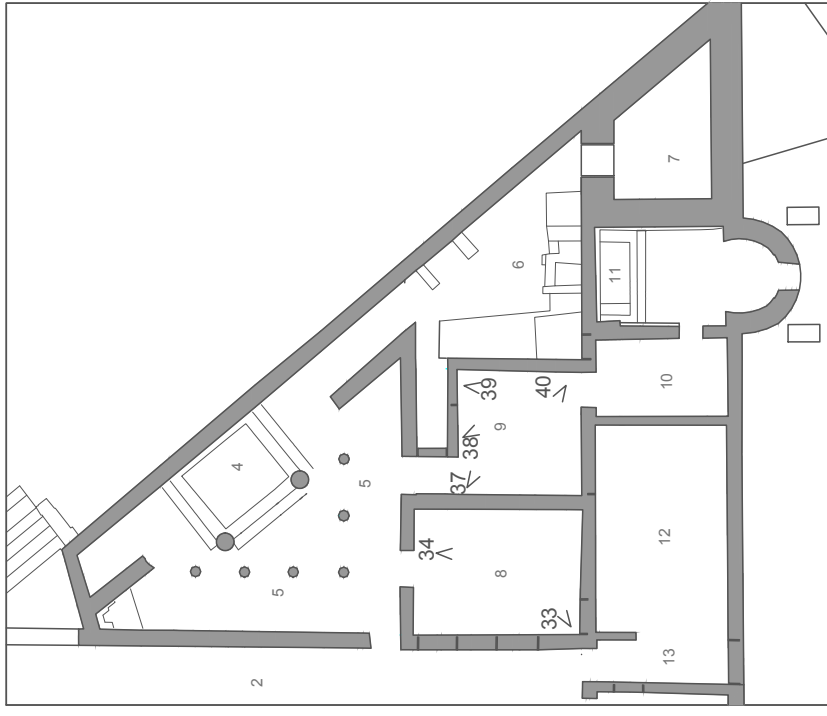
B.2.10

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

FACCIATA EST



Villa Diomede

B.2.11

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 8-9



37



40



34



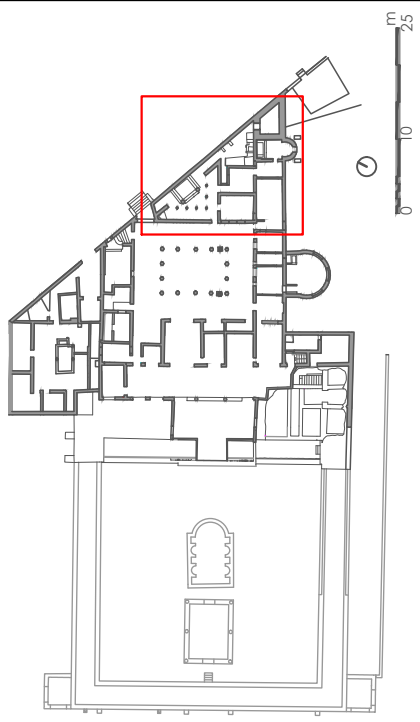
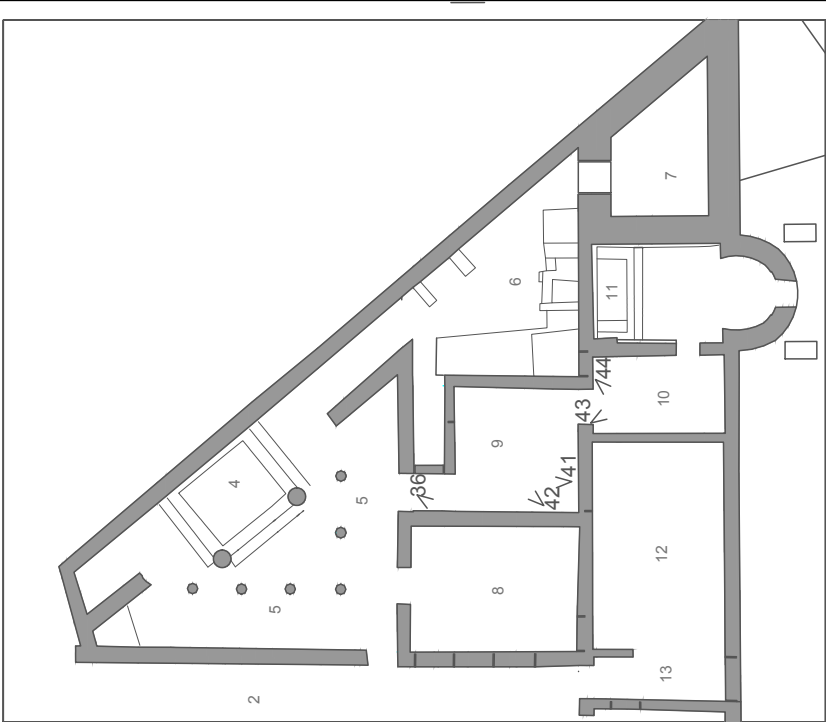
39



33



38



Villa Diomede

B.2.12

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 9-10



41



44



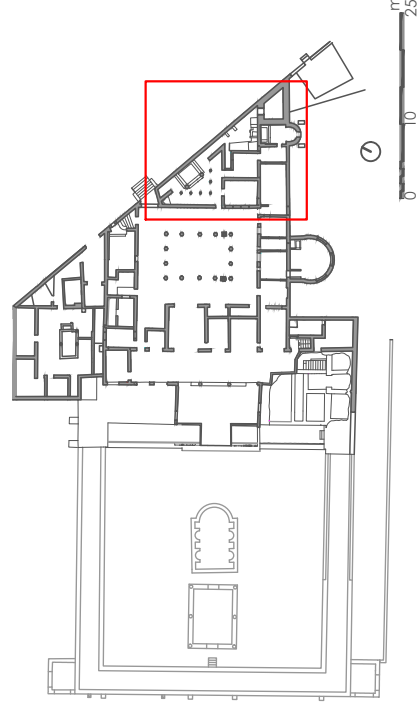
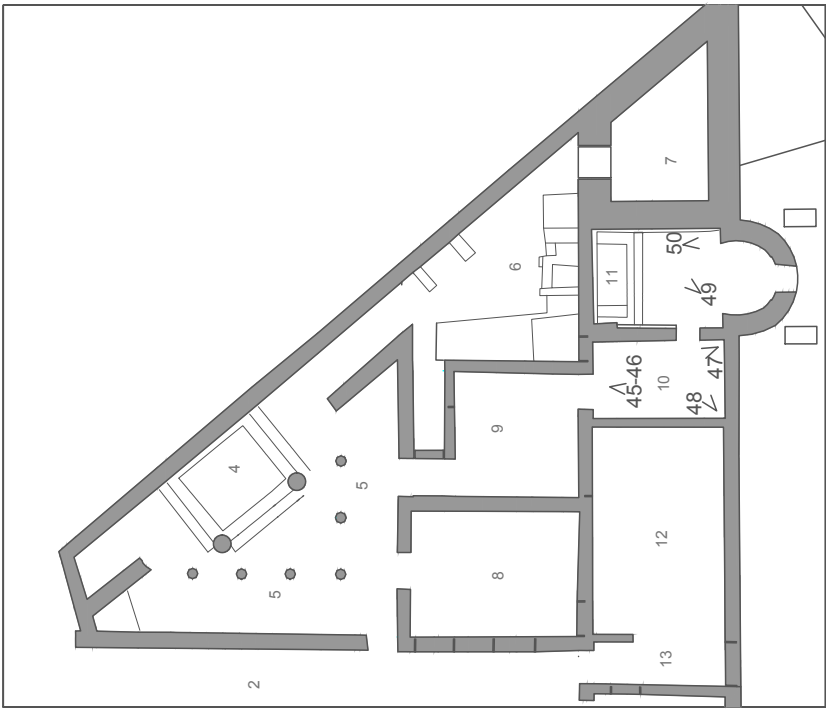
36



43



42



Villa Diomede
B.2.13
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
 AMBIENTI 10-11



47



50



46



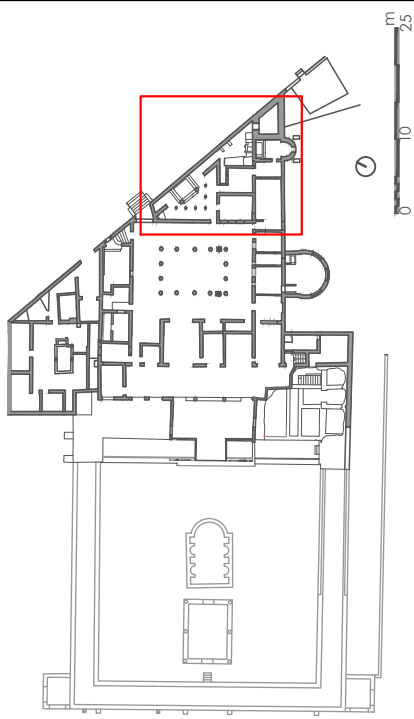
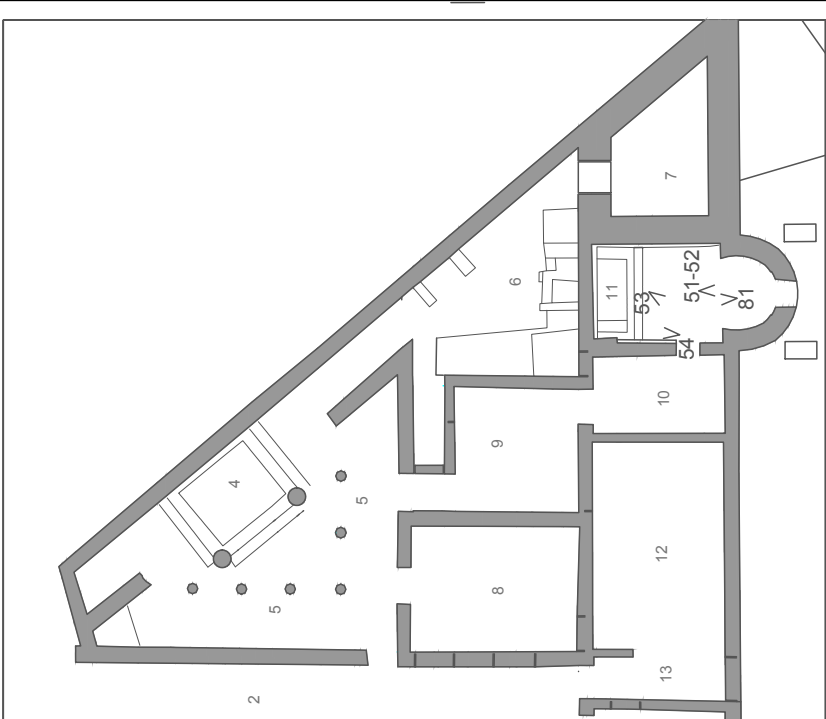
49



45



48



Villa Diomede
B.2.14
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
 AMBIENTE 11



81



54



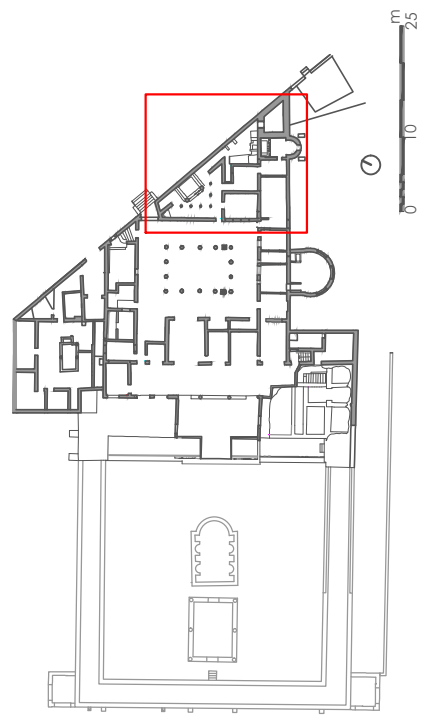
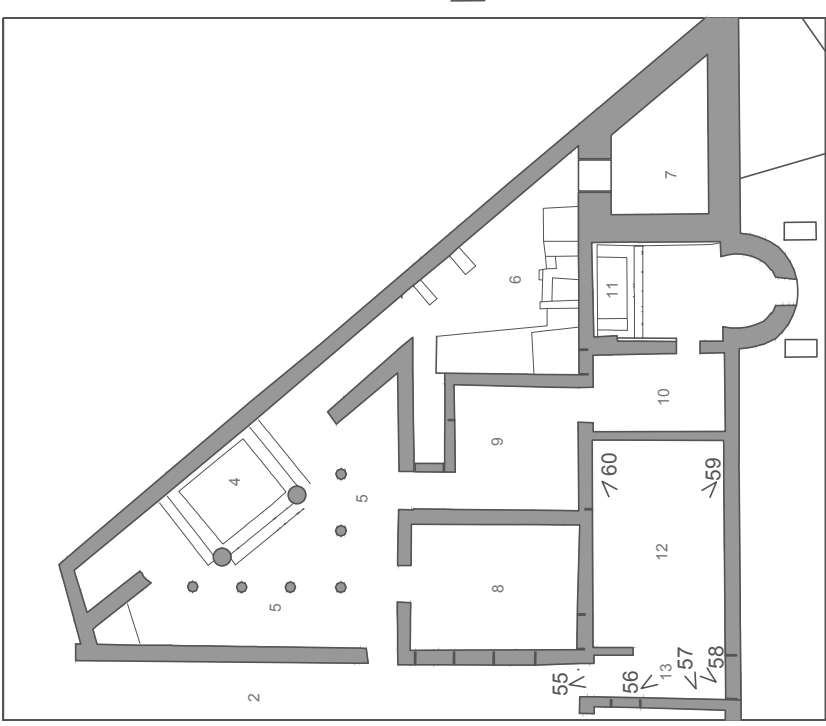
52



53



51



Villa Diomede
B.2.15
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
 AMBIENTI 12-13



57



60



56



59



55



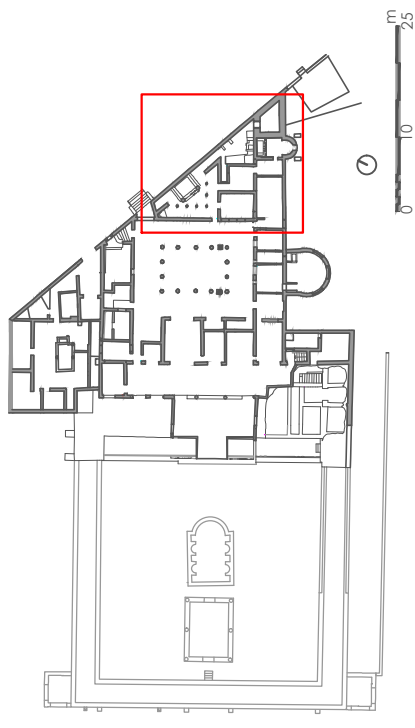
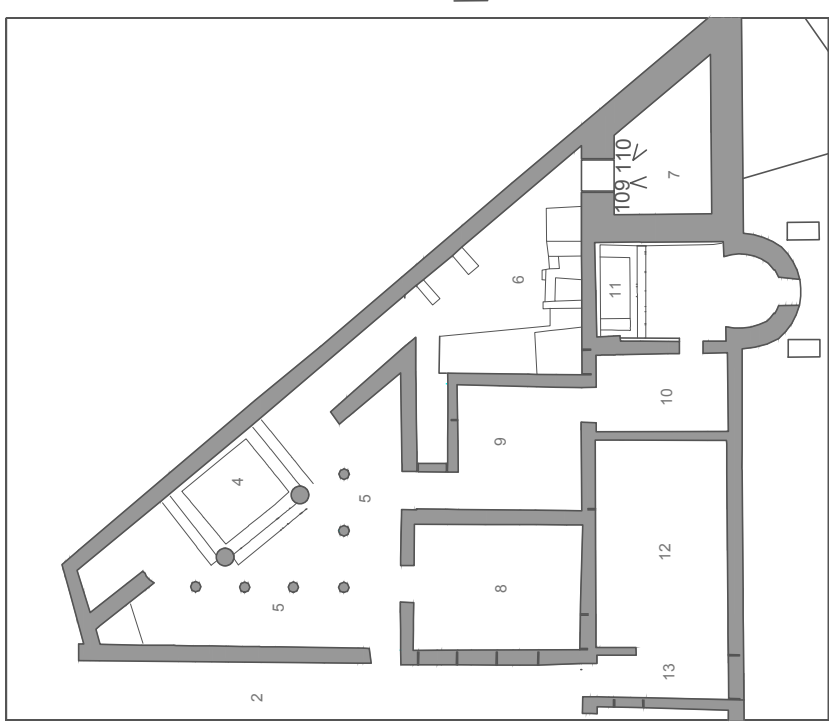
58



109



110



Villa Diomede

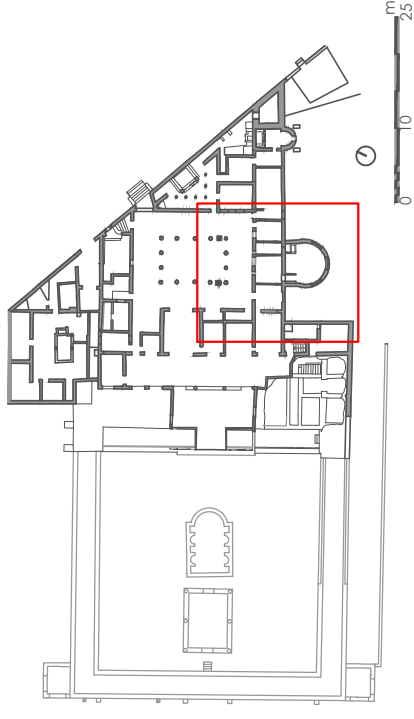
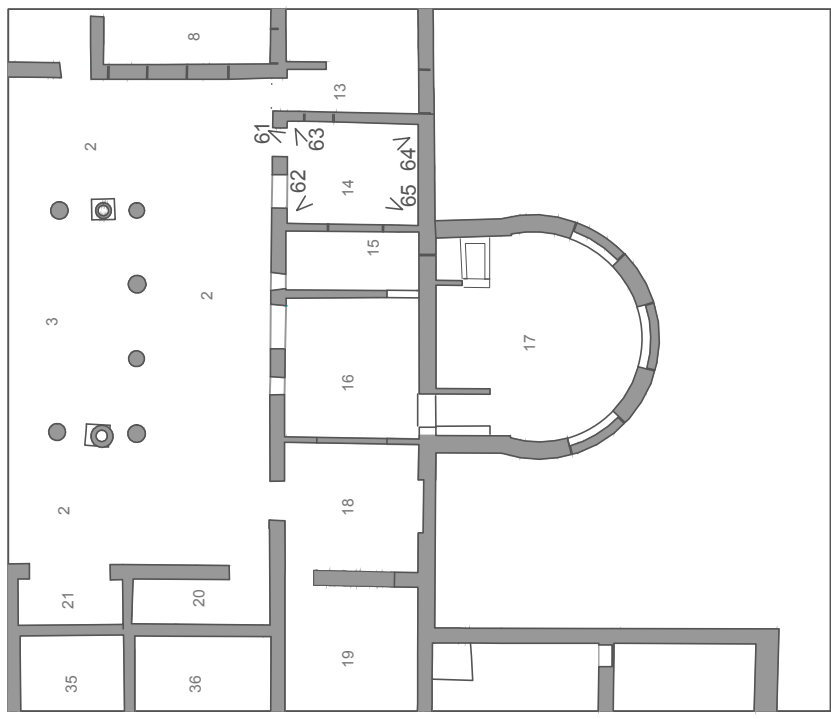
B.2.16

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTE 7



Villa Diomede
B.2.17
 Rilievo fotografico
 scala 1:200
 Piano terra
AMBIENTE 14



64



63



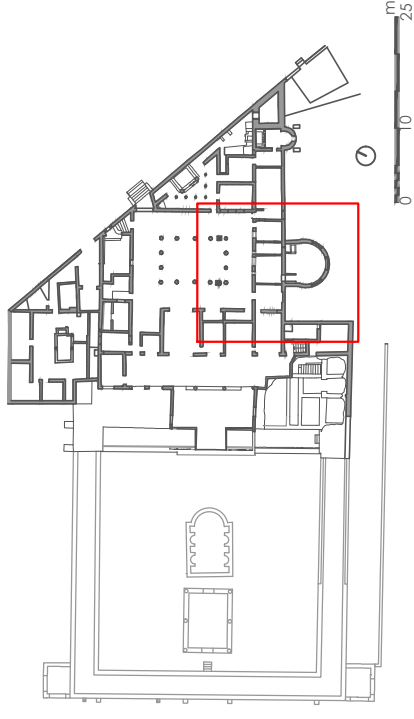
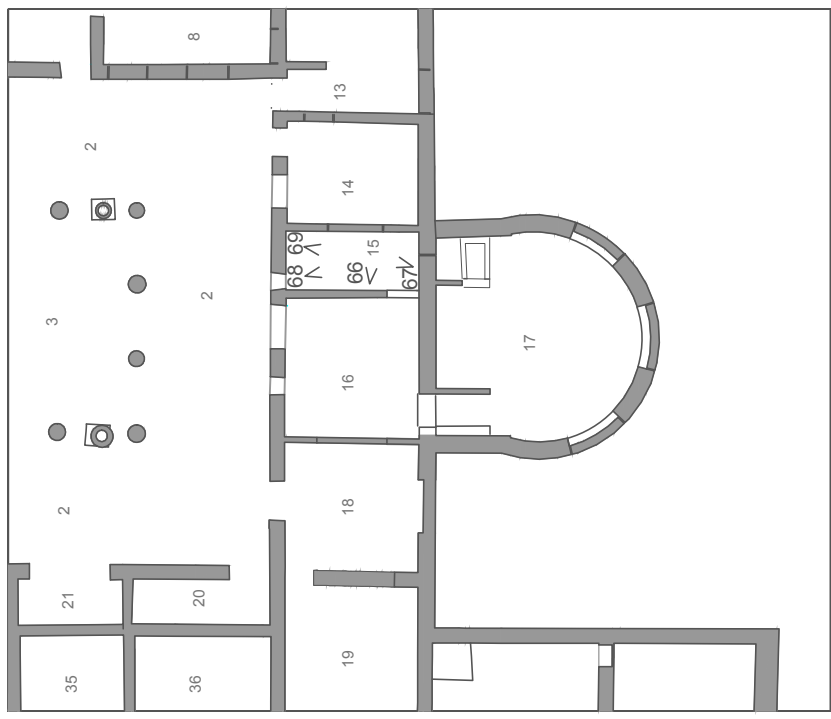
61



62



65



Villa Diomede
B.2.18
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
 AMBIENTE 15



69



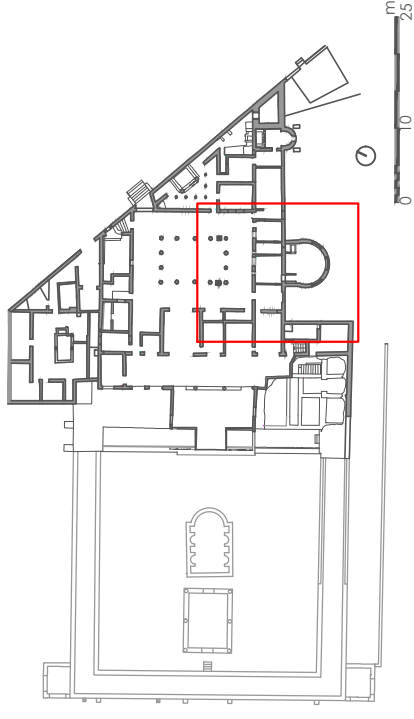
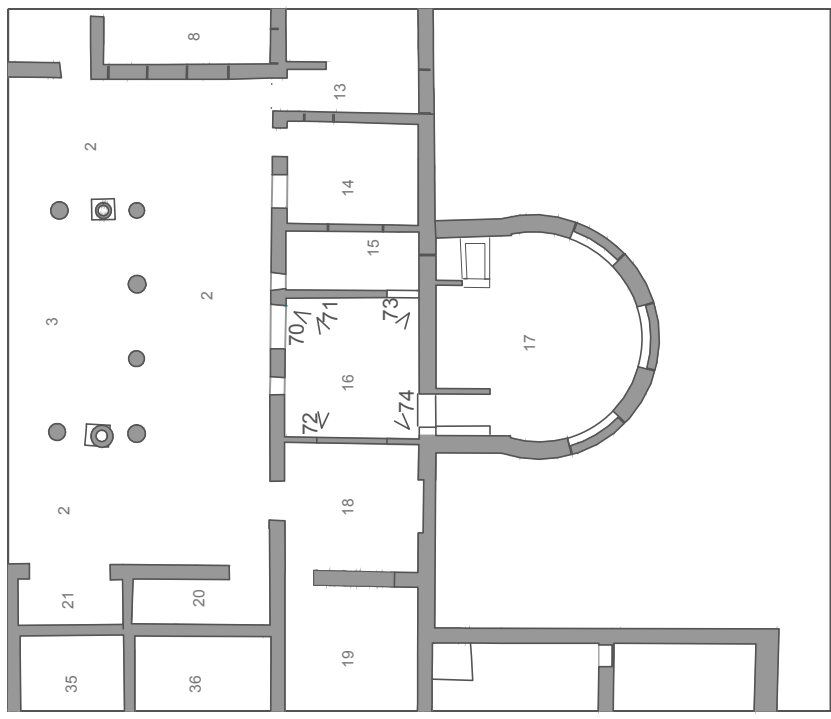
68



67



66



Villa Diomede
B.2.19
 Rilievo fotografico
 scala 1:200
 Piano terra
AMBIENTE 16



72



71



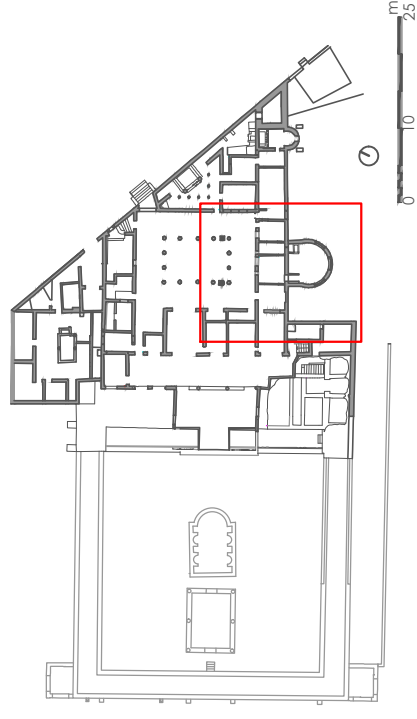
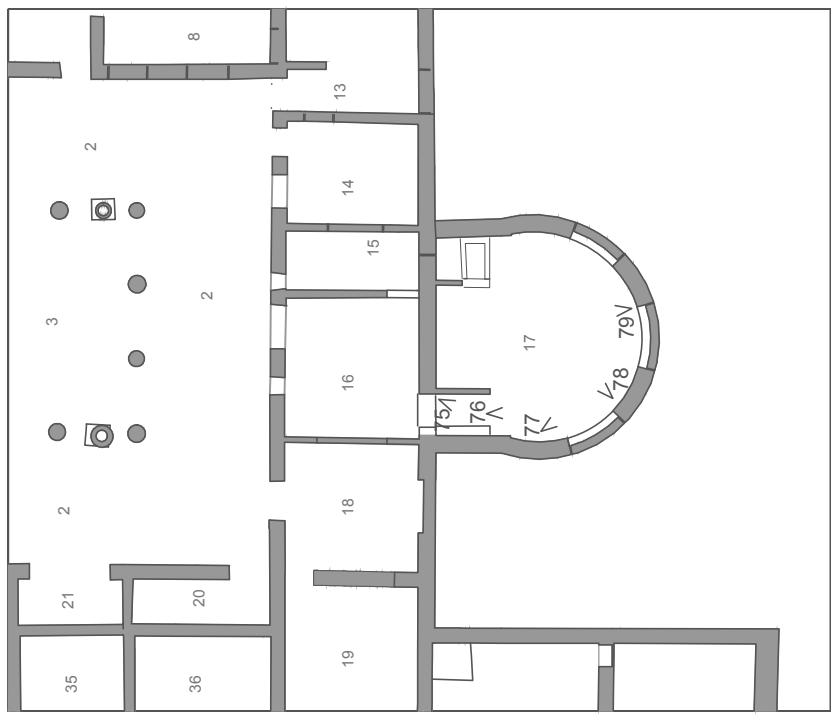
74



70



73



Villa Diomede
B.2.20
RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:200
 Piano terra
AMBIENTE 17



77



76



75



79



78



80



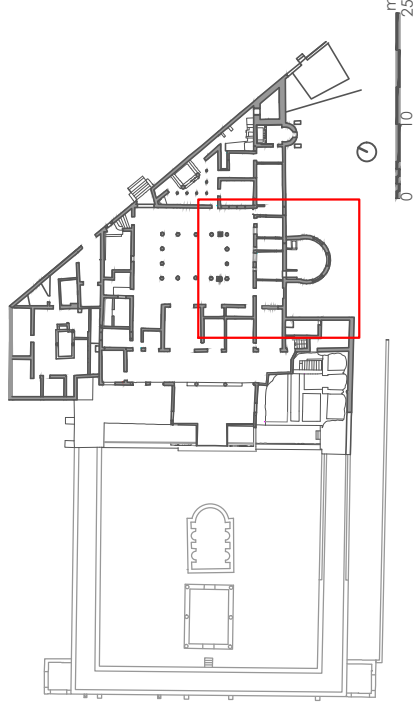
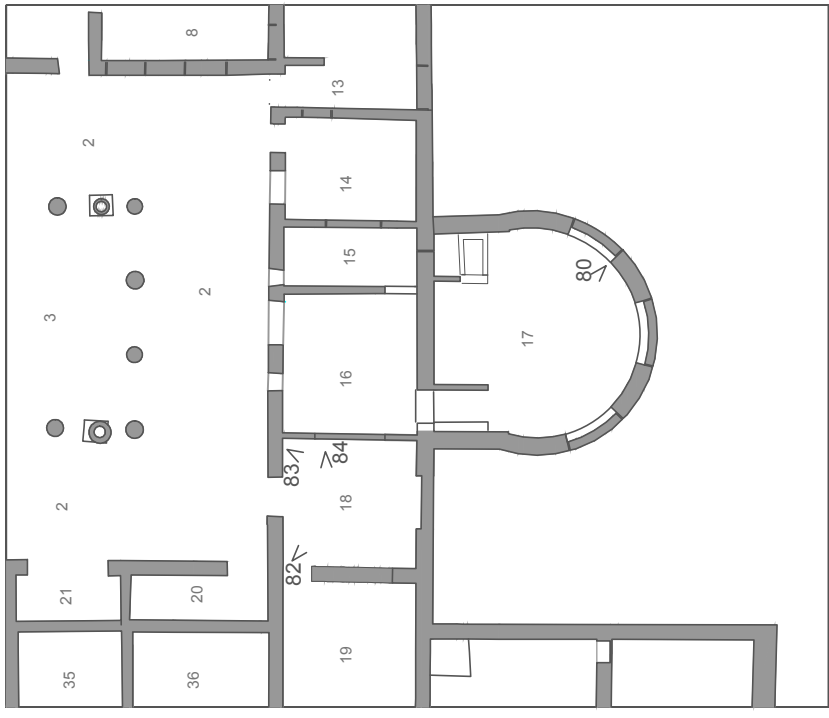
82



83



84



Villa Diomede

B.2.21

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

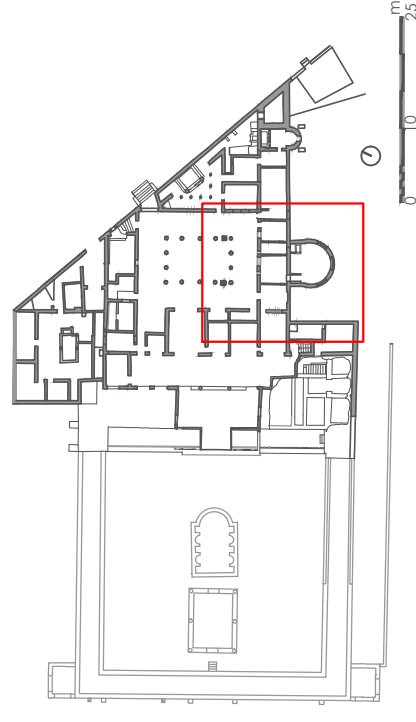
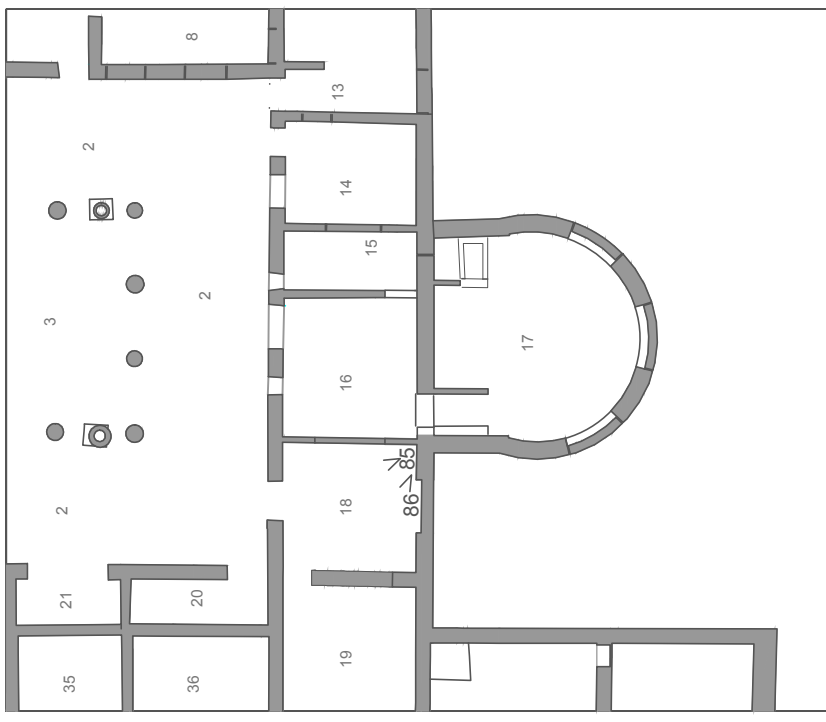
AMBIENTI 17-18



85



86



Villa Diomede

B.2.22

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTE 18



88



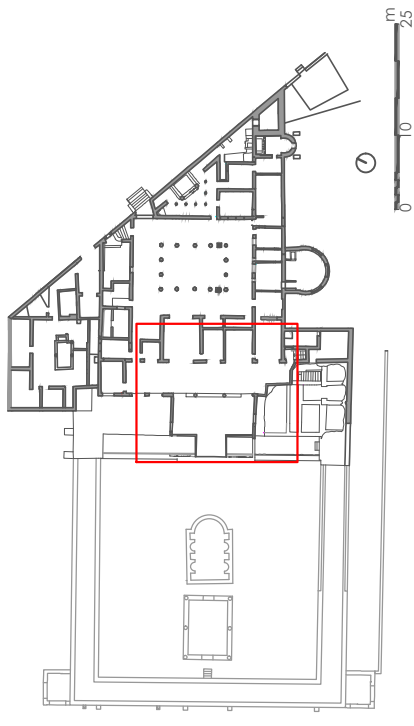
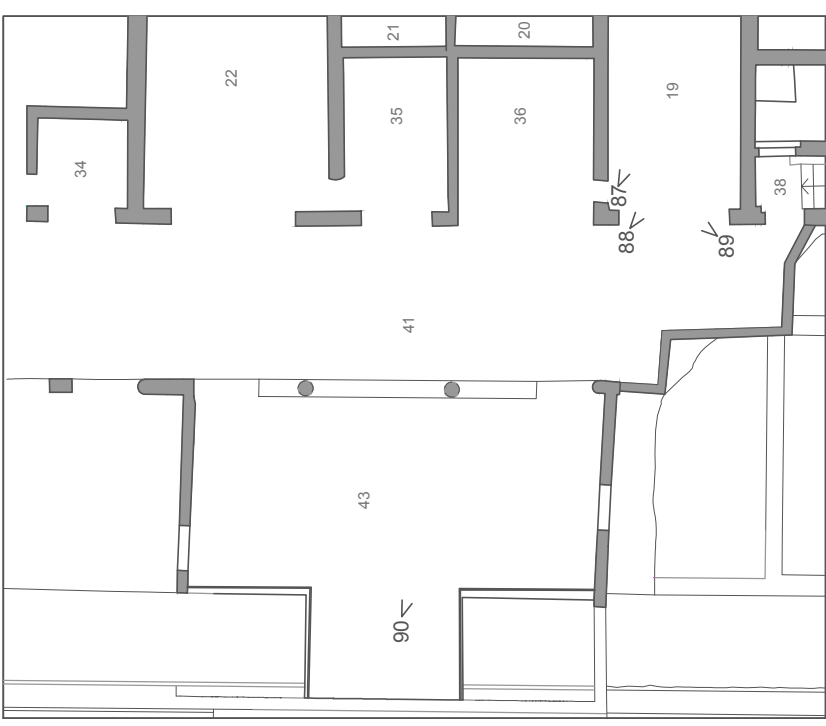
87



90



89



0 10 25
m

Villa Diomede
B.2.23
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 Piano terra
 scala 1:200
 AMBIENTE 19



91



94



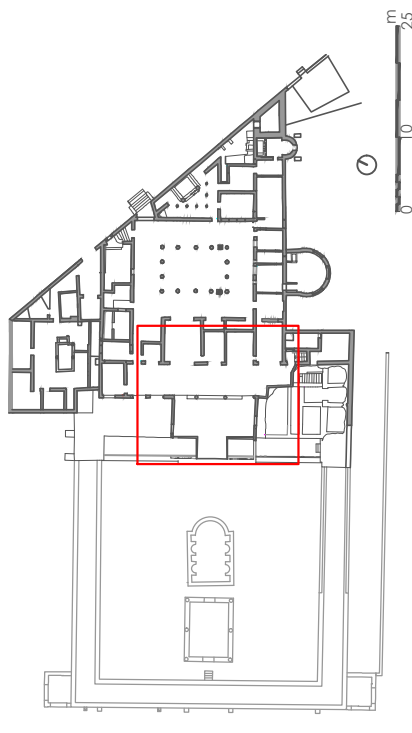
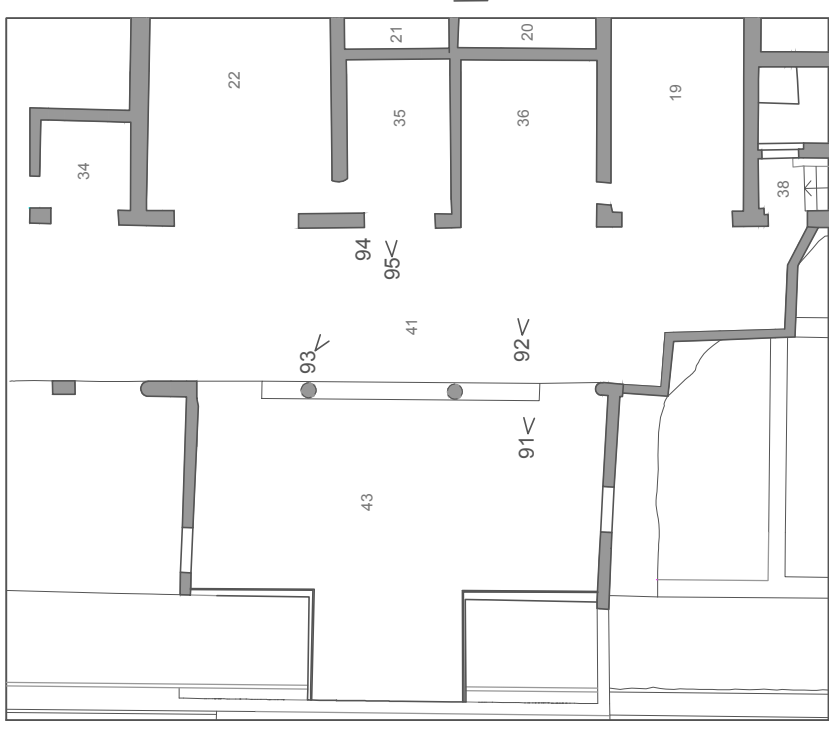
95



92



93



Villa Diomede

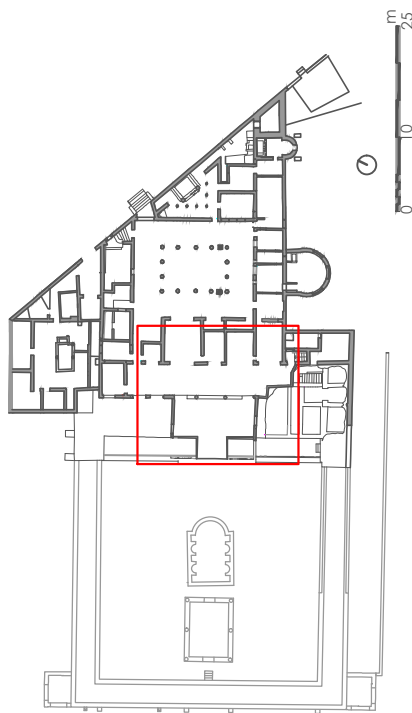
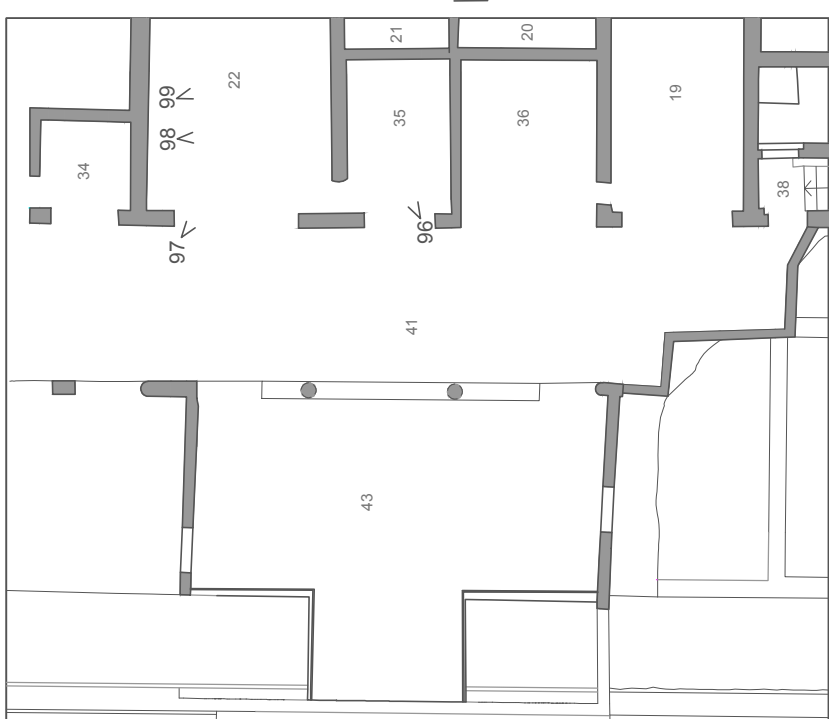
B.2.24

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 35-36-41



Villa Diomede

B.2.25

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:200

Piano terra

AMBIENTI 22-35



97



99



96



98



112



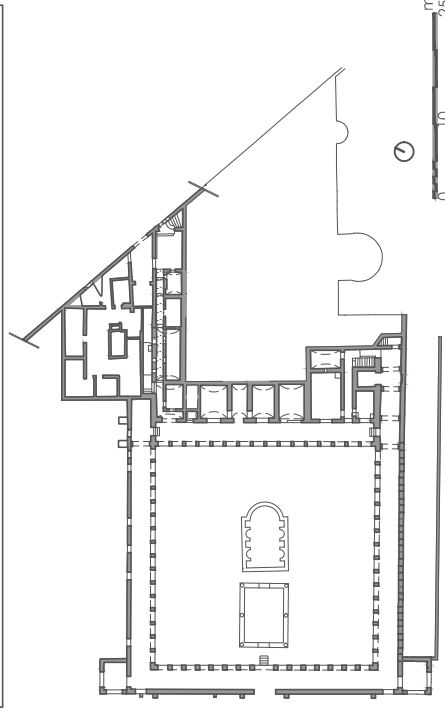
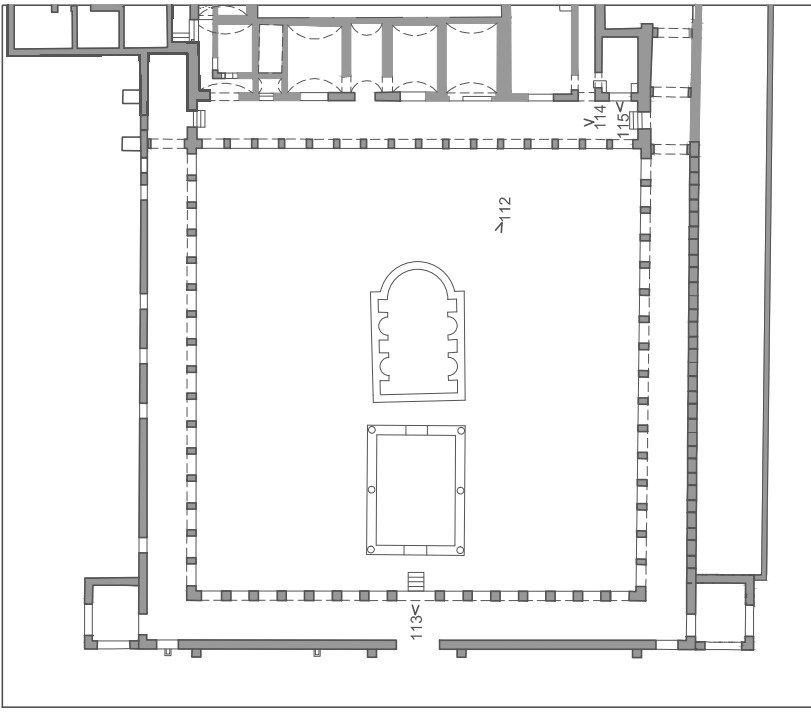
115



114



113



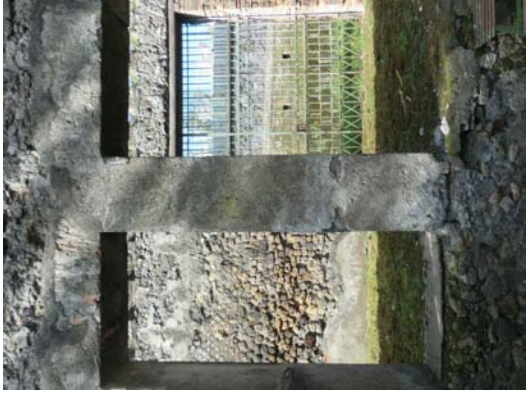
Villa Diomede
B.2.26
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:500
 PORTICO



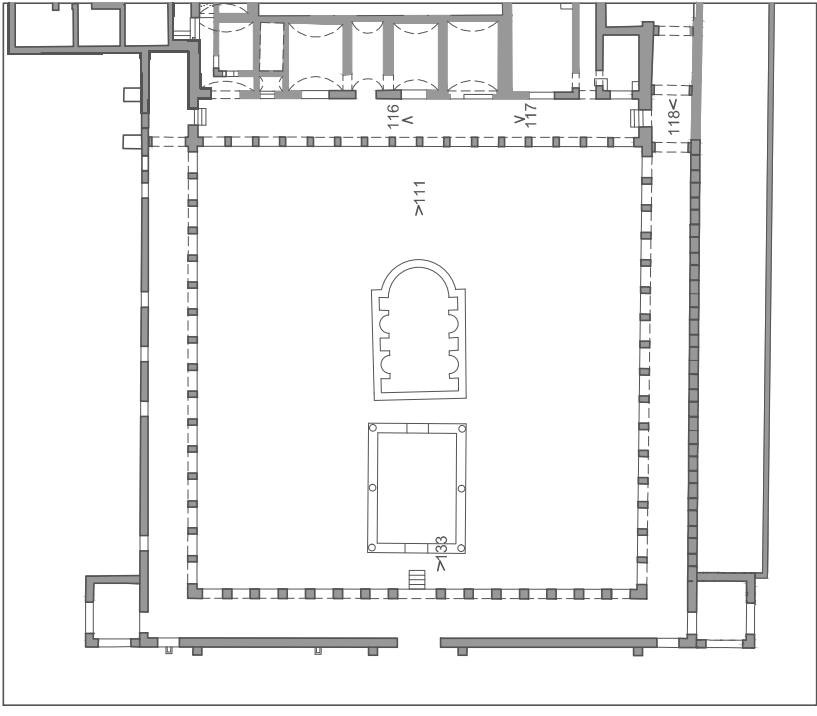
111



116



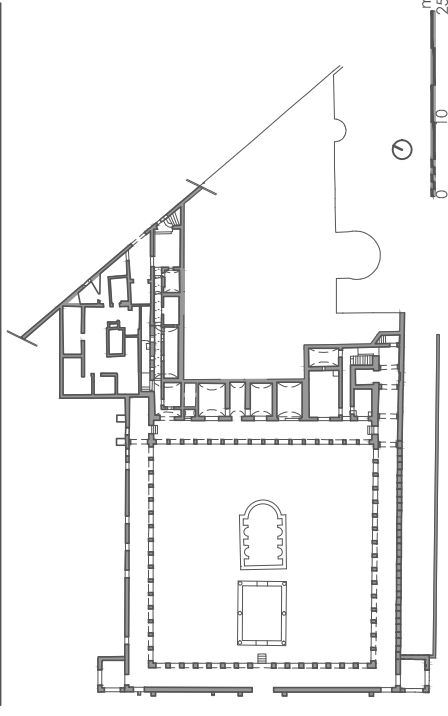
133



117



118



Villa Diomede

B.2.27

scala 1:500

RILIEVO FOTOGRAFICO

PORTICO



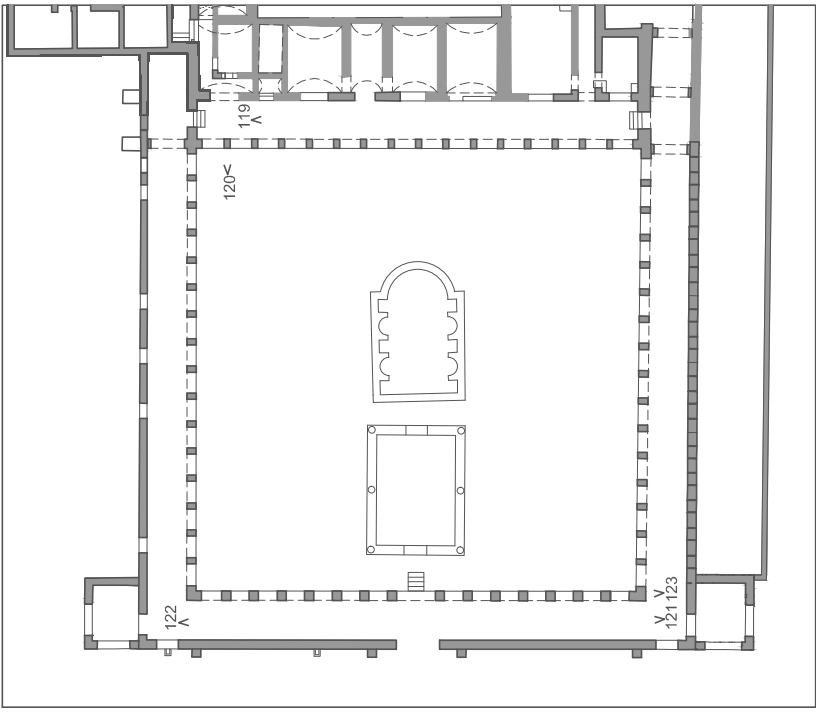
119



120



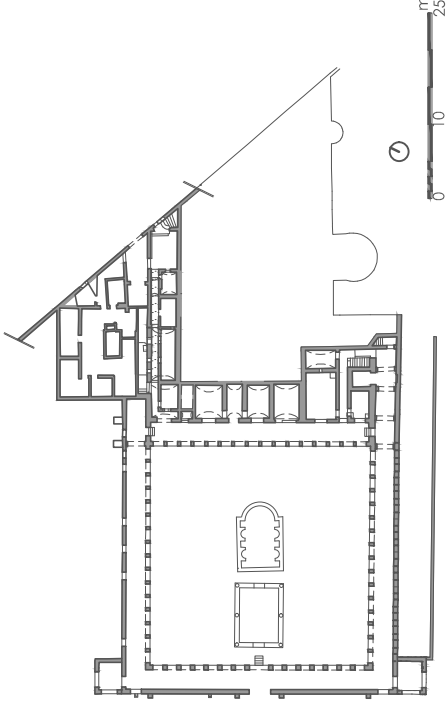
123



121



122



Villa Diomede

B.2.28

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:500

PORTICO



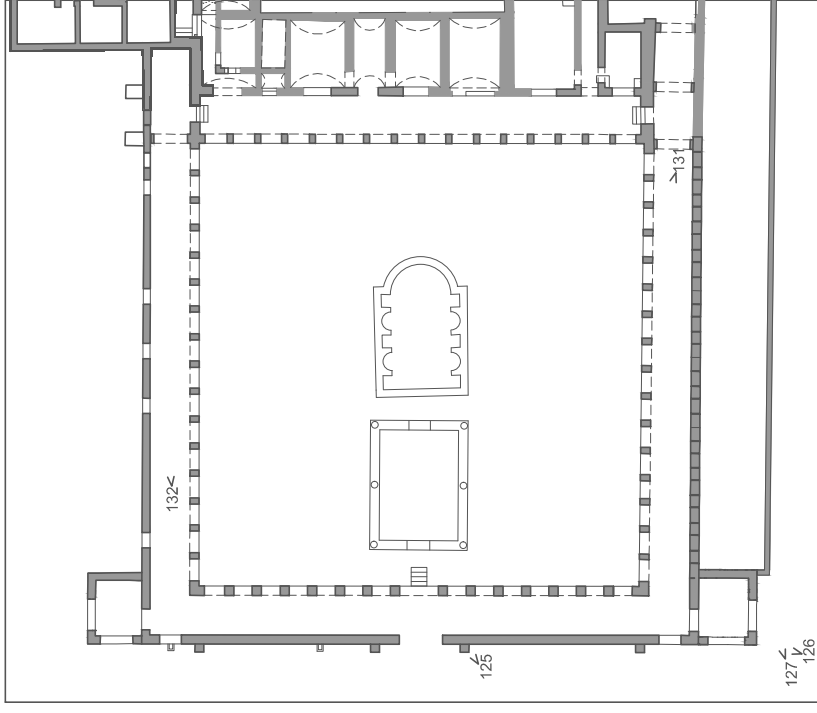
125



131



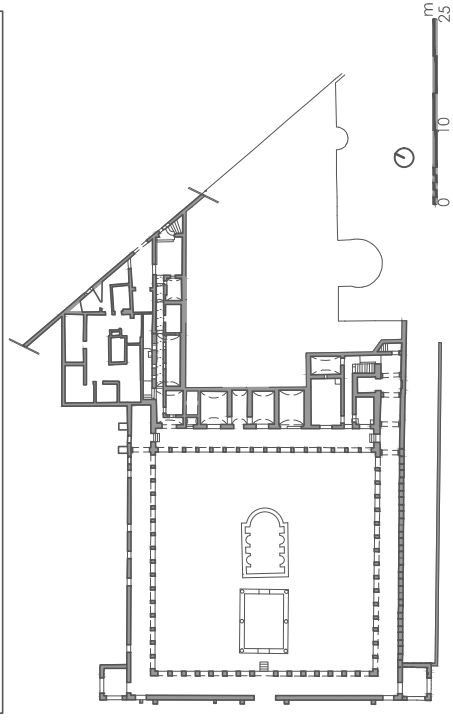
132



126



127



Villa Diomede

B.2.29

RILIEVO FOTOGRAFICO

scala 1:500

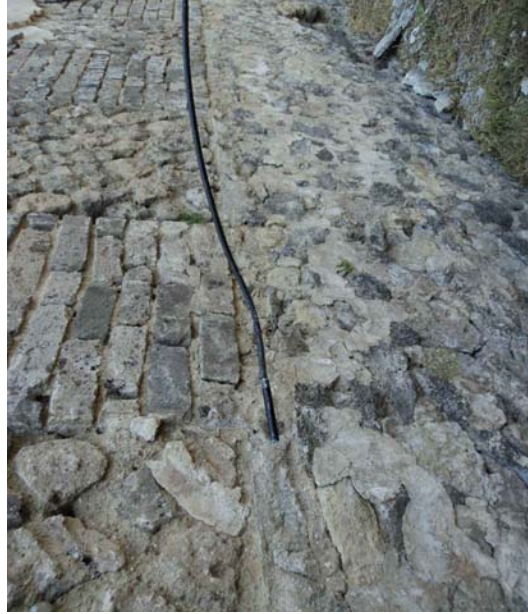
PORTICO



128



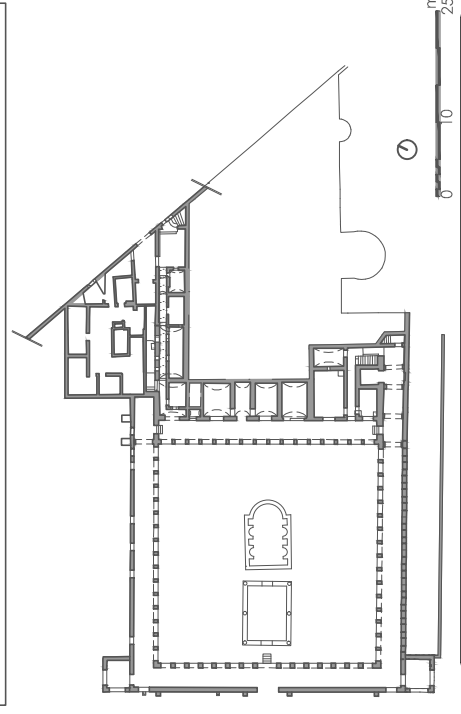
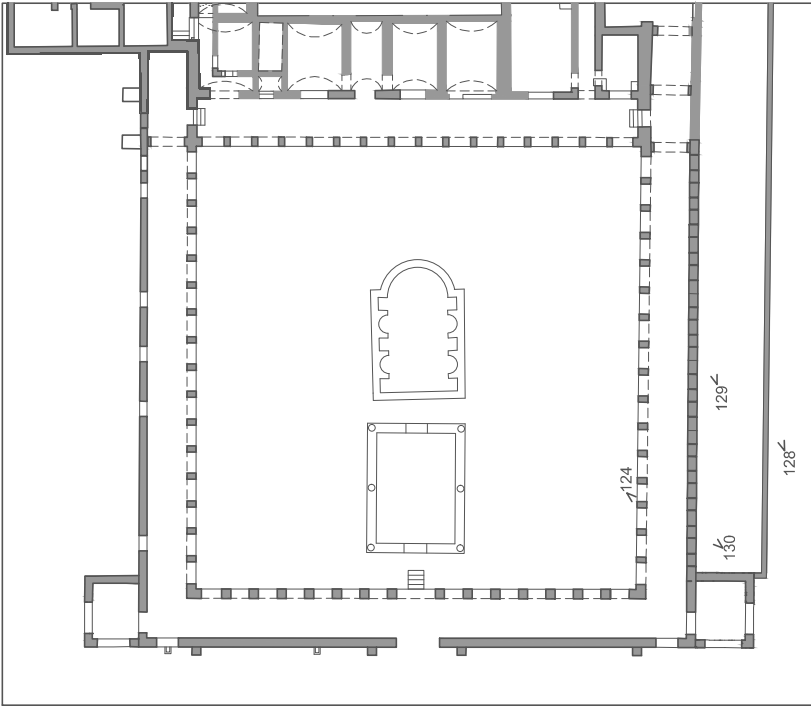
129



130



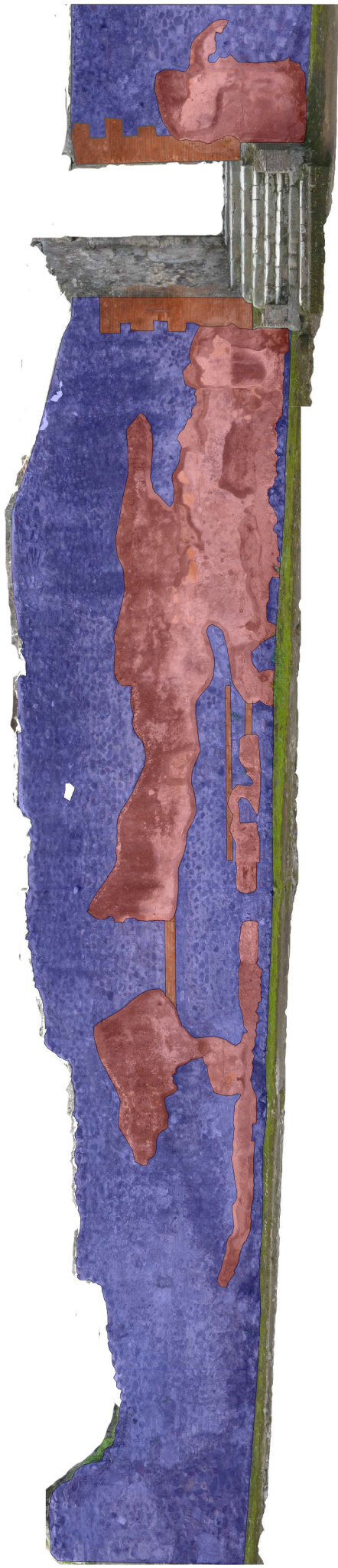
124











Villa Diomede
B.2.30
 RILIEVO FOTOGRAFICO
 scala 1:500
 PORTICO

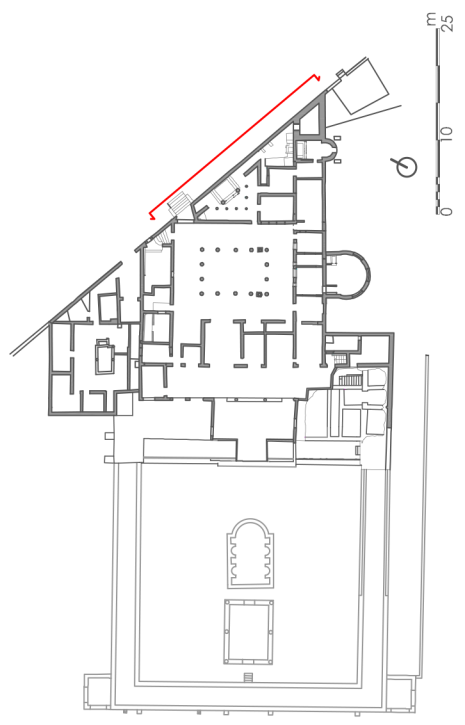
Allegato B.3

Rilievo delle tipologie murarie



LEGENDA:

- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | SUPERFICIE COPERTA |  | OPUS LATERICIUM
E OPUS MIXTUM |
|  | OPUS QUADRATUM |  | OPUS RETICOLATUM |
|  | PIETRE SBOZZATE |  | OPUS INCERTUM
GIUNTI DI MALTA DI
ELEVATO SPESSORE |
|  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI PICCOLE DIMENSIONI |  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI GRANDI DIMENSIONI |



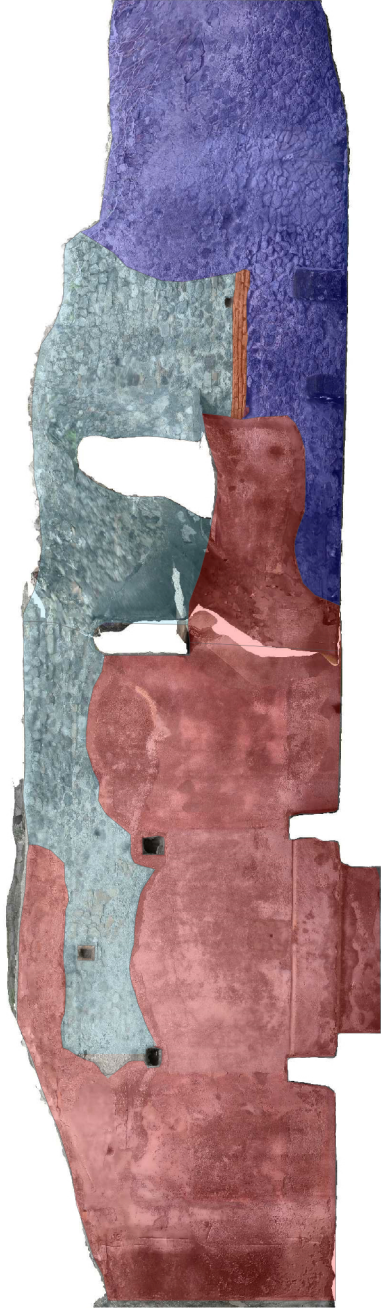
Villa Diomede

B.3.01

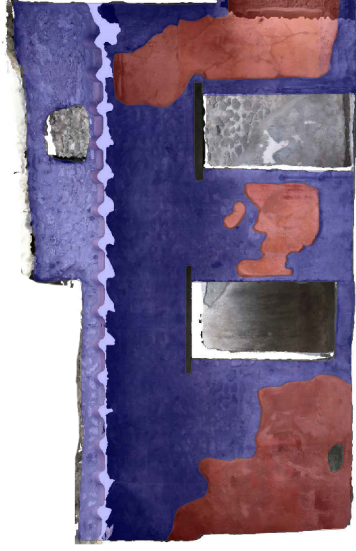
RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE

scala 1:100

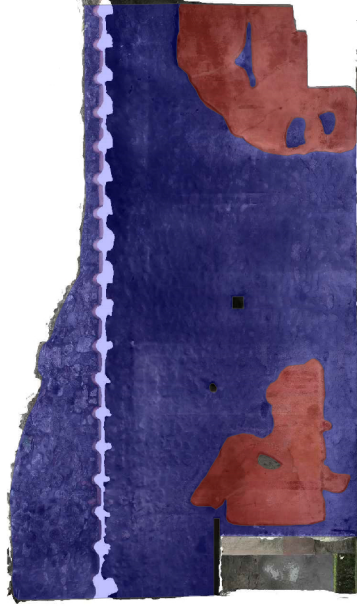
FACCIATA EST



5 E



5 S

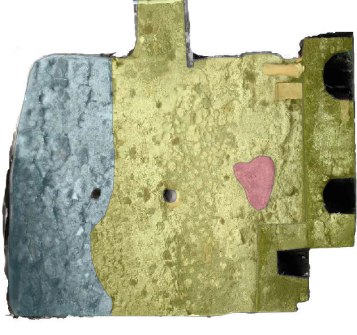


5 W











6 S

6 E

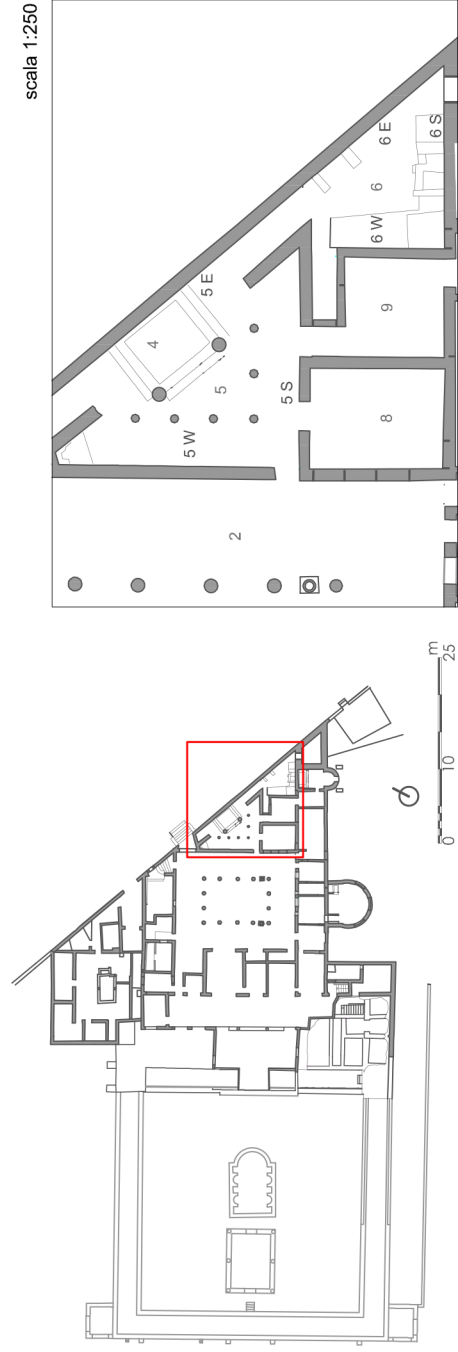


6 W

LEGENDA:

- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | SUPERFICIE COPERTA |  | OPUS LATERICIUM
E OPUS MIXTUM |
|  | OPUS QUADRATUM |  | OPUS RETICOLATUM |
|  | PIETRE SBOZZATE |  | OPUS INCERTUM
GIUNTI DI MALTA DI
ELEVATO SPESSORE |
|  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI PICCOLE DIMENSIONI |  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI GRANDI DIMENSIONI |

scala 1:250



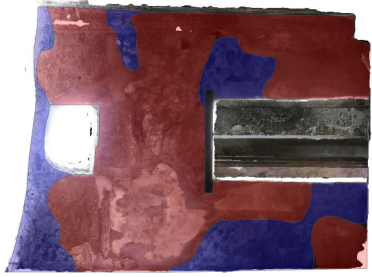
Villa Diomedea

B.3.02

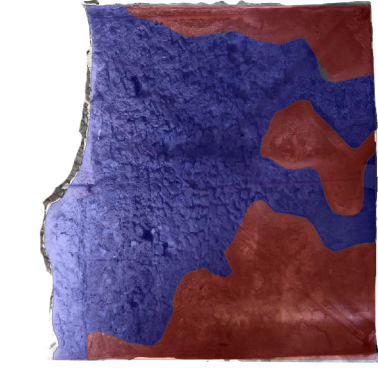
RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE

scala 1:100

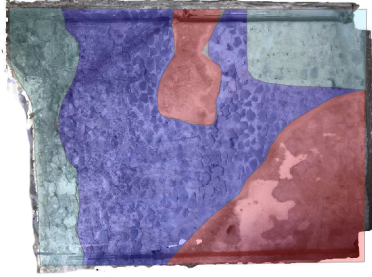
AMBIENTE 5-6



8 A



8 B



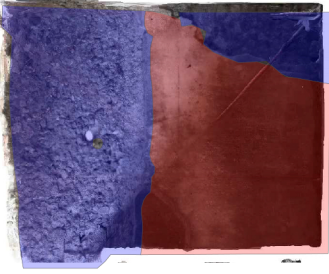
8 C



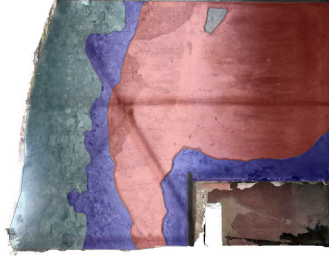
8 D



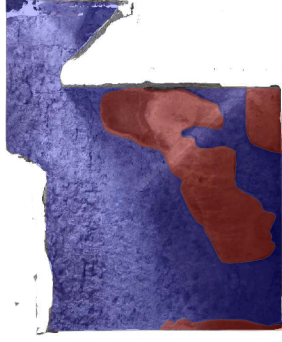
9 A



9 B











9 C

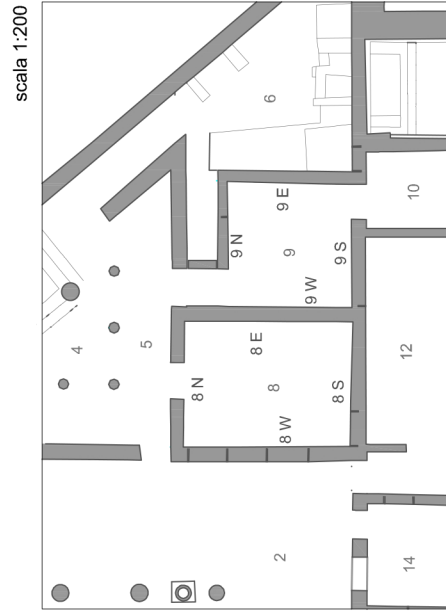
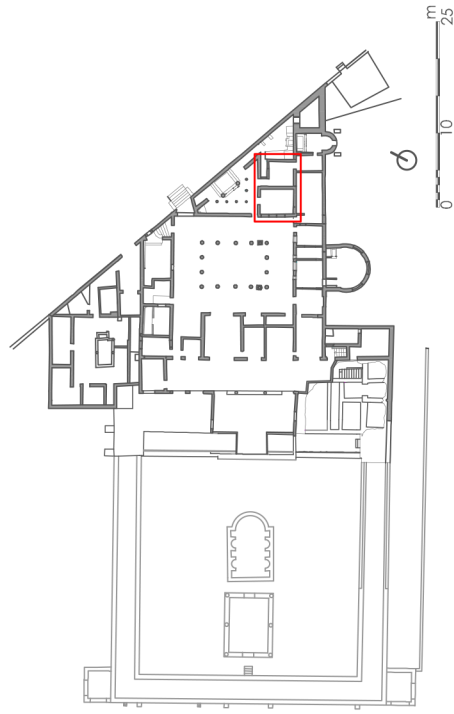


9 D

LEGENDA:

	SUPERFICIE COPERTA		OPUS LATERICIUM E OPUS MIXTUM
	OPUS QUADRATUM		OPUS RETICOLATUM
	PIETRE SBOZZATE		OPUS INCERTUM GIUNTI DI MALTA DI ELEVATO SPESSORE
	OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI PICCOLE DIMENSIONI		OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI

scala 1:200



Villa Diomede

B.3.03

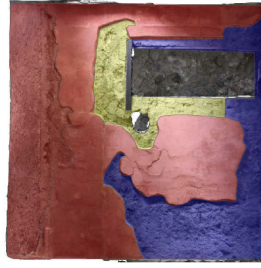
**RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE**

scala 1:100

AMBIENTI 8-9



10 A



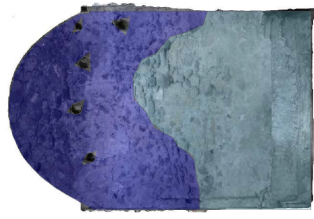
10 B



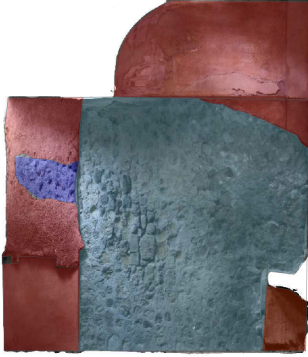
10 C



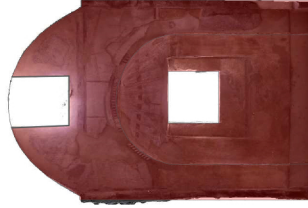
10 D



11 A



11 B



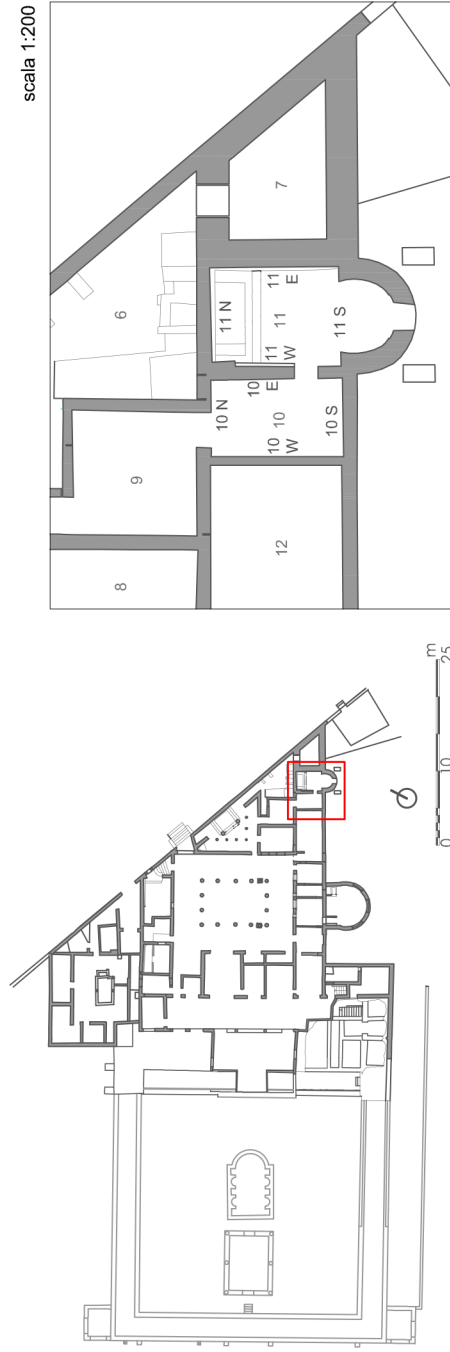
11 C



11 D

LEGENDA:

- SUPERFICIE COPERTA
- OPUS QUADRATUM
- PIETRE SBOZZATE
- OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI PICCOLE DIMENSIONI
- OPUS LATERICIUM E OPUS MIXTUM
- OPUS RETICOLATUM
- OPUS INCERTUM GIUNTI DI MALTA DI ELEVATO SPESSORE
- OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI



Villa Diomede

B.3.04

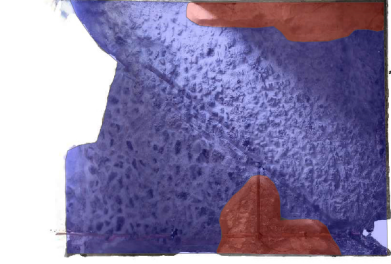
RILIEVO TIPOLOGICO STRUTTURALE

scala 1:100

AMBIENTI 10-11



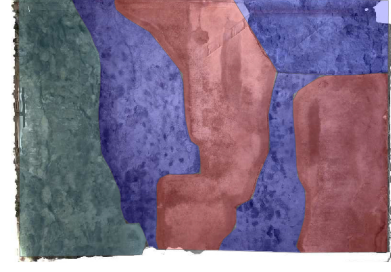
12 N



12 E



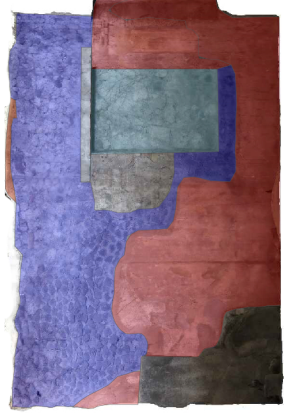
12 S



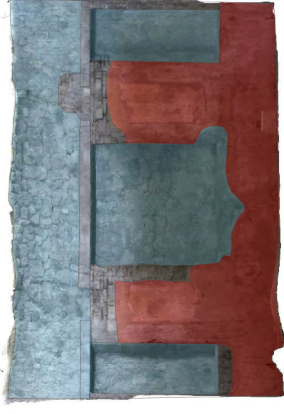
12 W



17 N



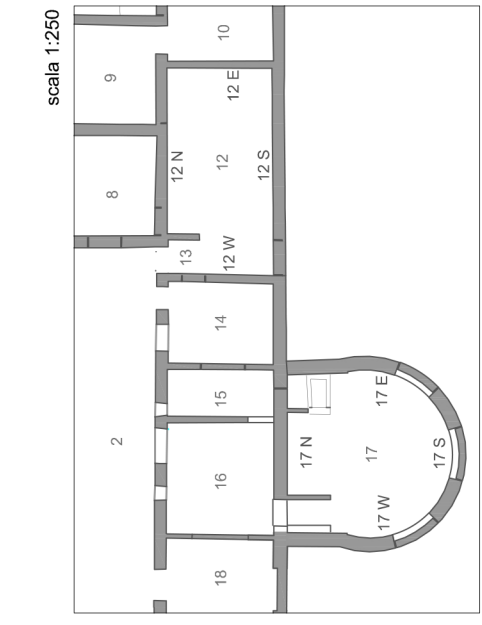
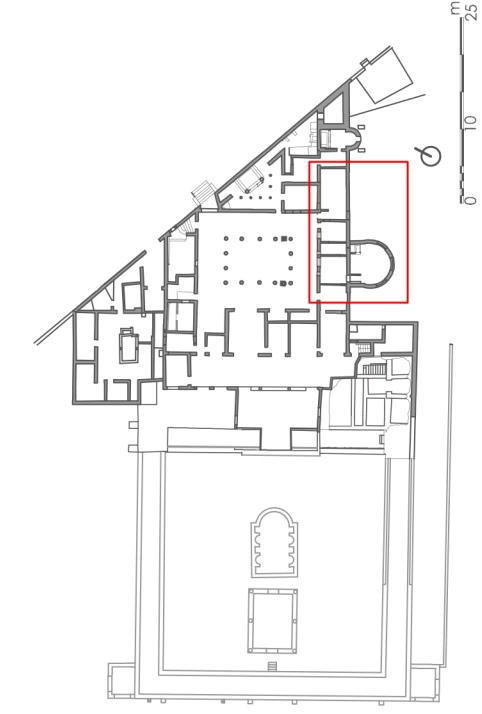
17 E



17 S



17 W



LEGENDA:

- SUPERFICIE COPERTA
- OPUS QUADRATUM
- PIETRE SBOZZATE
- OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI PICCOLE DIMENSIONI
- OPUS LATERICIUM
E OPUS MIXTUM
- OPUS RETICOLATUM
- OPUS INCERTUM
GIUNTI DI MALTA DI
ELEVATO SPESSORE
- OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI GRANDI DIMENSIONI

B.3.05

Villa Diomede
**RILIEVO TIPOLOGICO
 STRUTTURALE**

scala 1:100
AMBIENTI 12-17



16 N



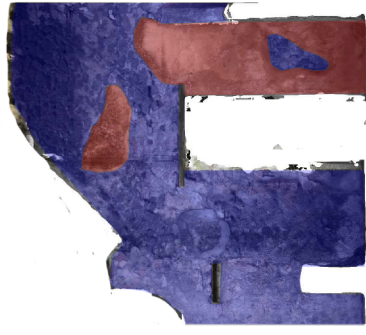
16 E



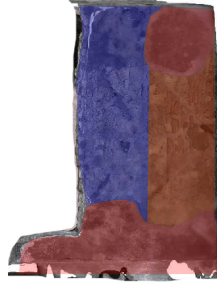
16 S



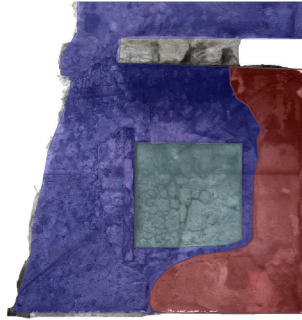
16 W



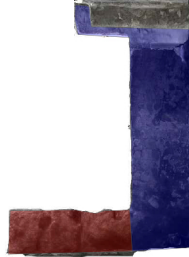
18 N



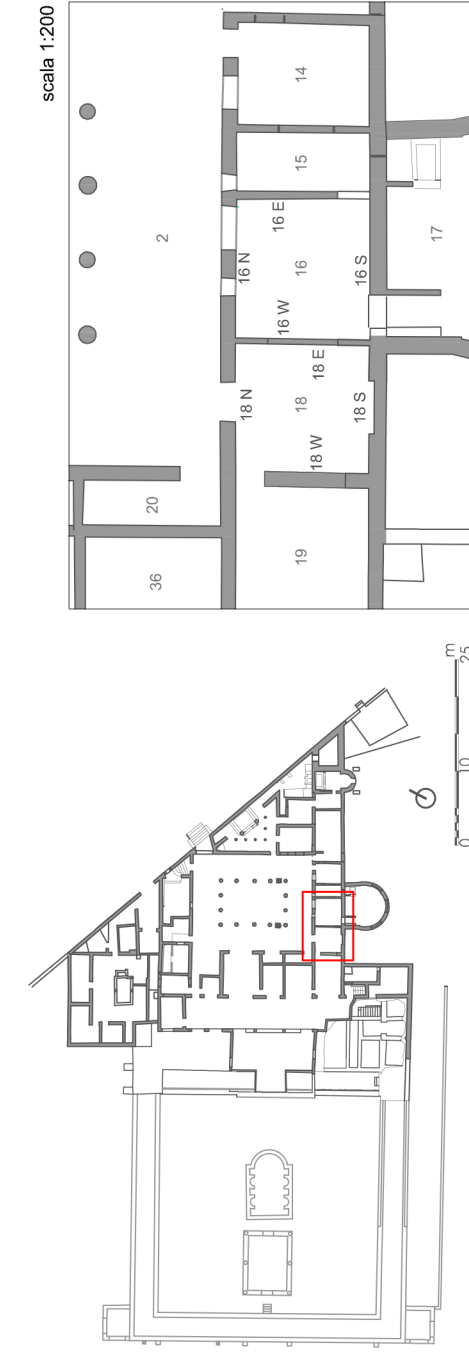
18 E



18 S



18 W



LEGENDA:

	SUPERFICIE COPERTA		OPUS LATERICIUM E OPUS MIXTUM
	OPUS QUADRATUM		OPUS RETICOLATUM
	PIETRE SBOZZATE		OPUS INCERTUM GIUNTI DI MALTA DI ELEVATO SPESSORE
	OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI PICCOLE DIMENSIONI		OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI

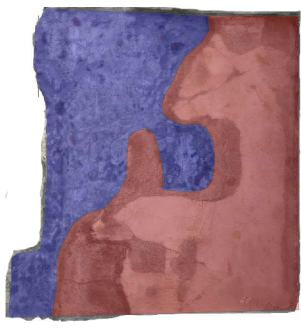
Villa Diomede

B.3.06

RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE

scala 1:100

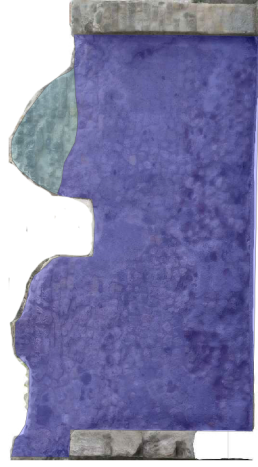
AMBIENTI 16-18



36 S



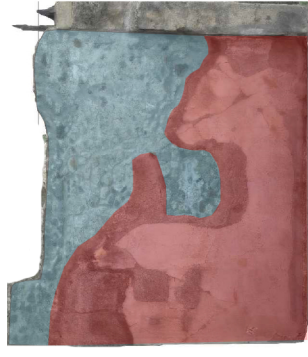
36 N



19 S



19 N



35 S



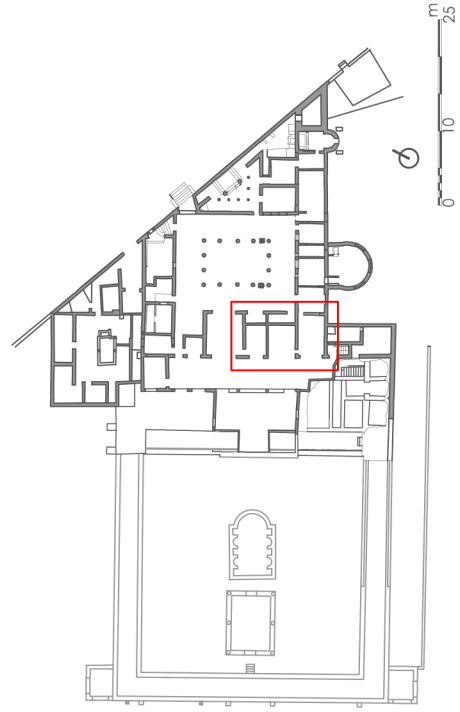
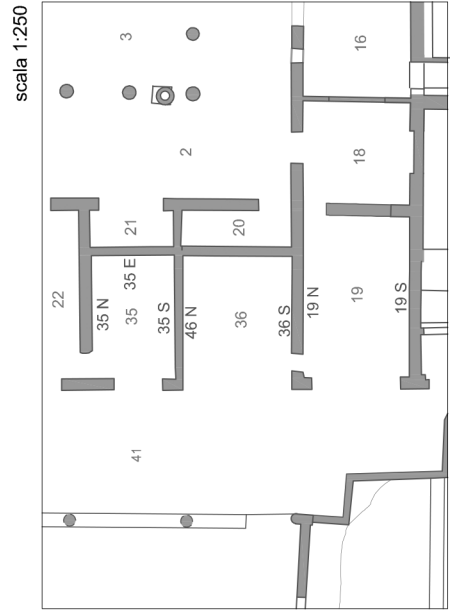
35 E



35 N

LEGENDA:

- SUPERFICIE COPERTA
- OPUS QUADRATUM
- PIETRE SBOZZATE
- OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI PICCOLE DIMENSIONI
- OPUS LATERICIUM E OPUS MIXTUM
- OPUS RETICOLATUM
- OPUS INCERTUM GIUNTI DI MALTA DI ELEVATO SPESSORE
- OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI



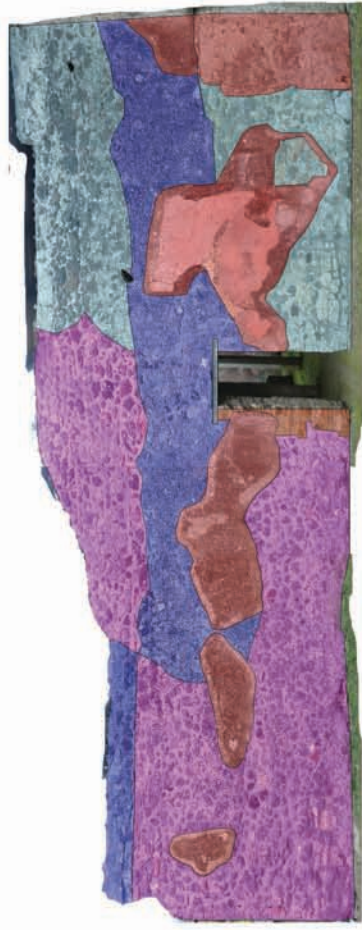
Villa Diomede

B.3.07

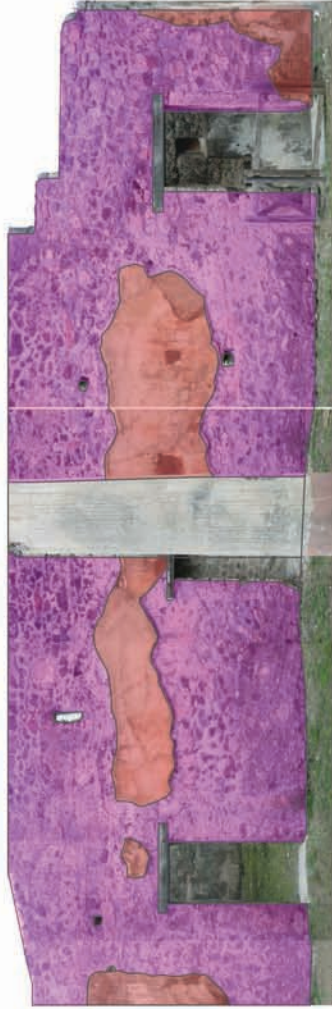
RILIEVO TIPOLOGICO STRUTTURALE

scala 1:100

AMBIENTI 19-35-36



2 E



2 N










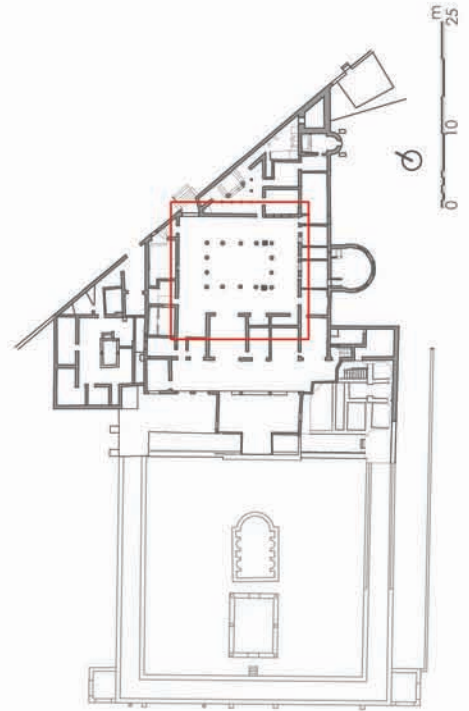
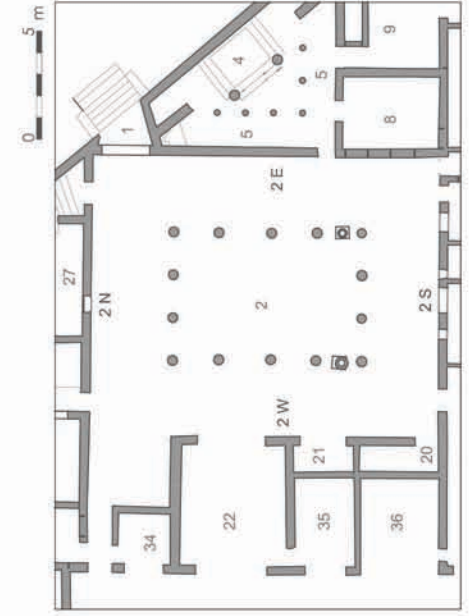
2 S



2 W

LEGENDA:

	SUPERFICIE COPERTA		OPUS QUADRATUM		OPUS RETICOLATUM
	PIETRE SBOZZATE		OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI PICCOLE DIMENSIONI		OPUS INCERTUM GIUNTI DI ALTA DI ELEVATO SPESSORE
	OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI		OPUS LATERICIUM E OPUS MIXTUM		OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI

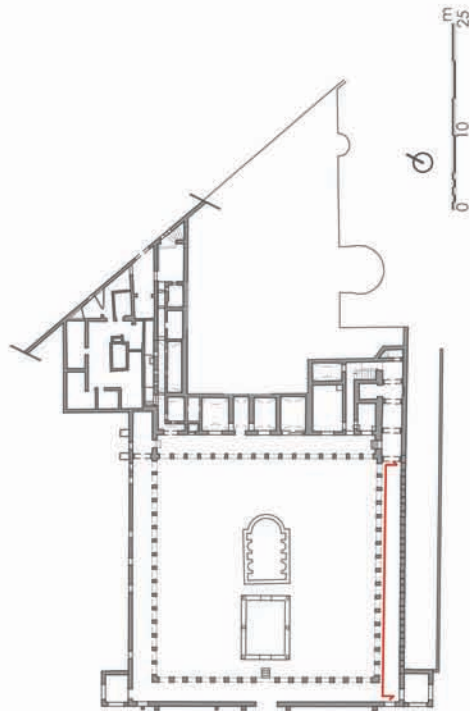
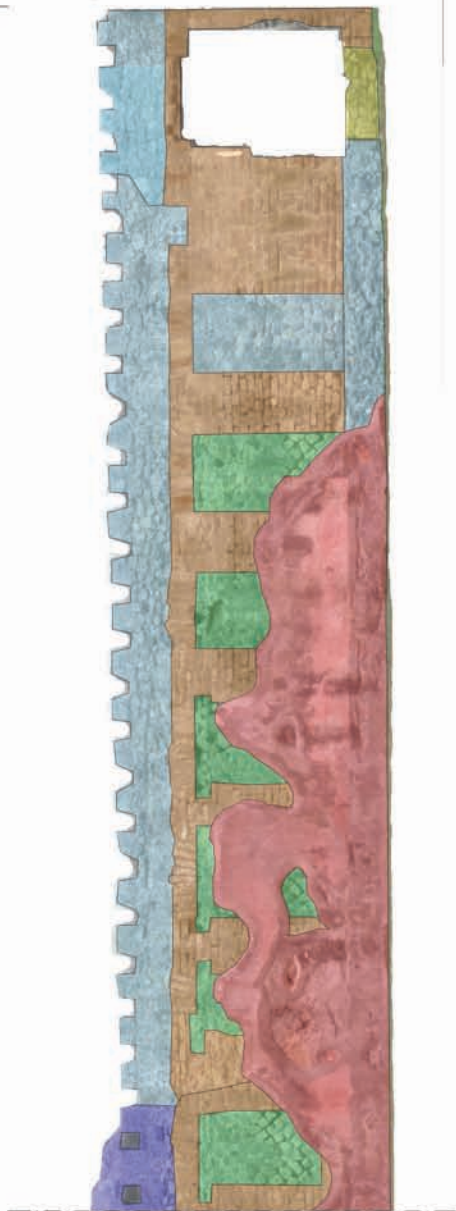
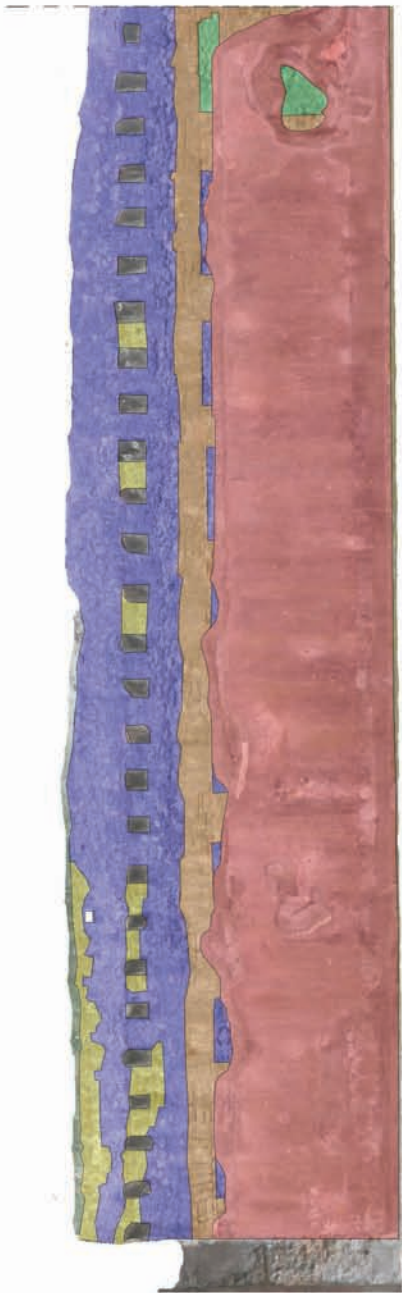


B.3.08

Villa Diomedea
RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE

scala 1:100

PERISTILIO



LEGENDA:

- SUPERFICIE COPERTA
- OPUS QUADRATUM
- PIETRE SBOZZATE
- OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI PICCOLE DIMENSIONI

- OPUS LATERICIUM E OPUS MIXTUM
- OPUS RETICOLATUM
- OPUS INCERTUM GIUNTI DI ALTA, DI ELEVATO SPESSORE
- OPUS INCERTUM ELEMENTI RESISTENTI DI GRANDI DIMENSIONI

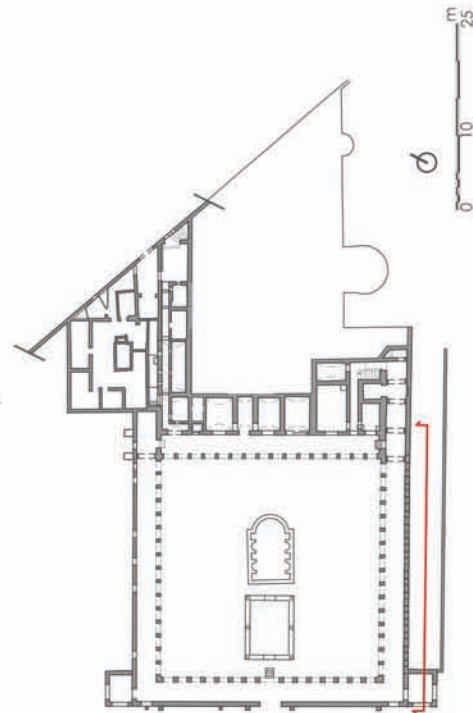
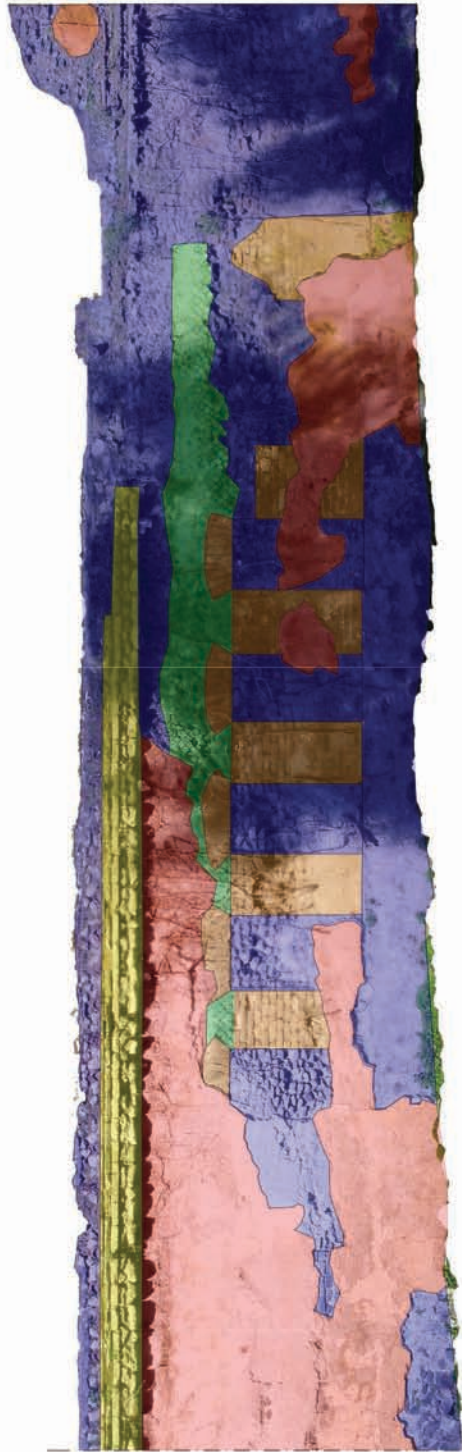
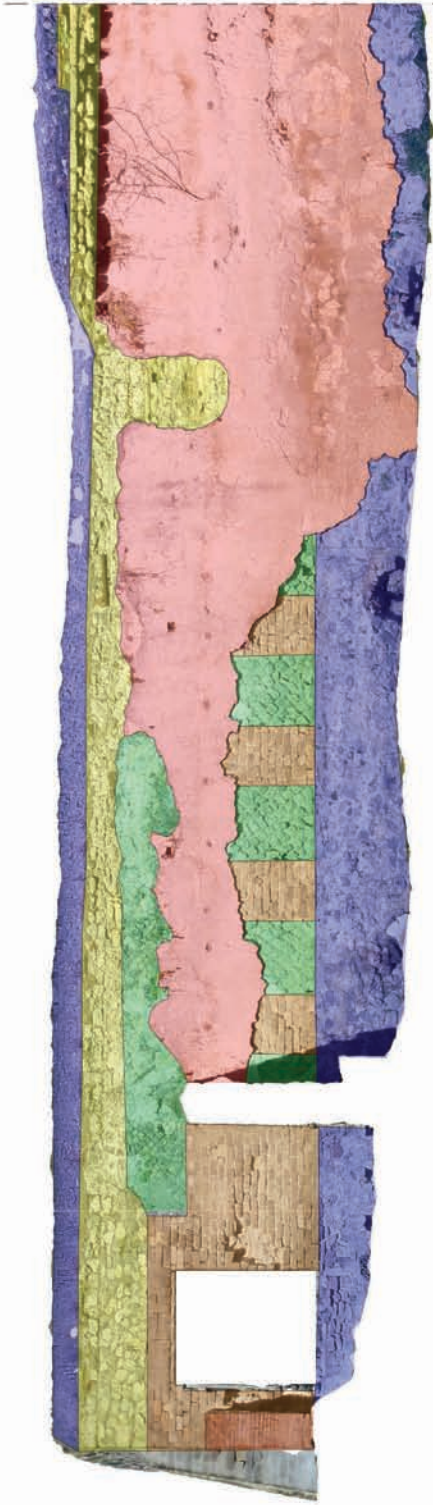
Villa Diomede

B.3.09

RILIEVO TIPOLOGICO STRUTTURALE

scala 1:100

MURO SUD



LEGENDA:

- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | SUPERFICIE COPERTA |  | OPUS LATERICIUM
E OPUS MIXTUM |
|  | OPUS QUADRATUM |  | OPUS RETICOLATUM |
|  | PIETRE SBOZZATE |  | OPUS INCERTUM
GIUNTI DI ALTA, DI
ELEVATO SPESSORE |
|  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI PICCOLE DIMENSIONI |  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI GRANDI DIMENSIONI |

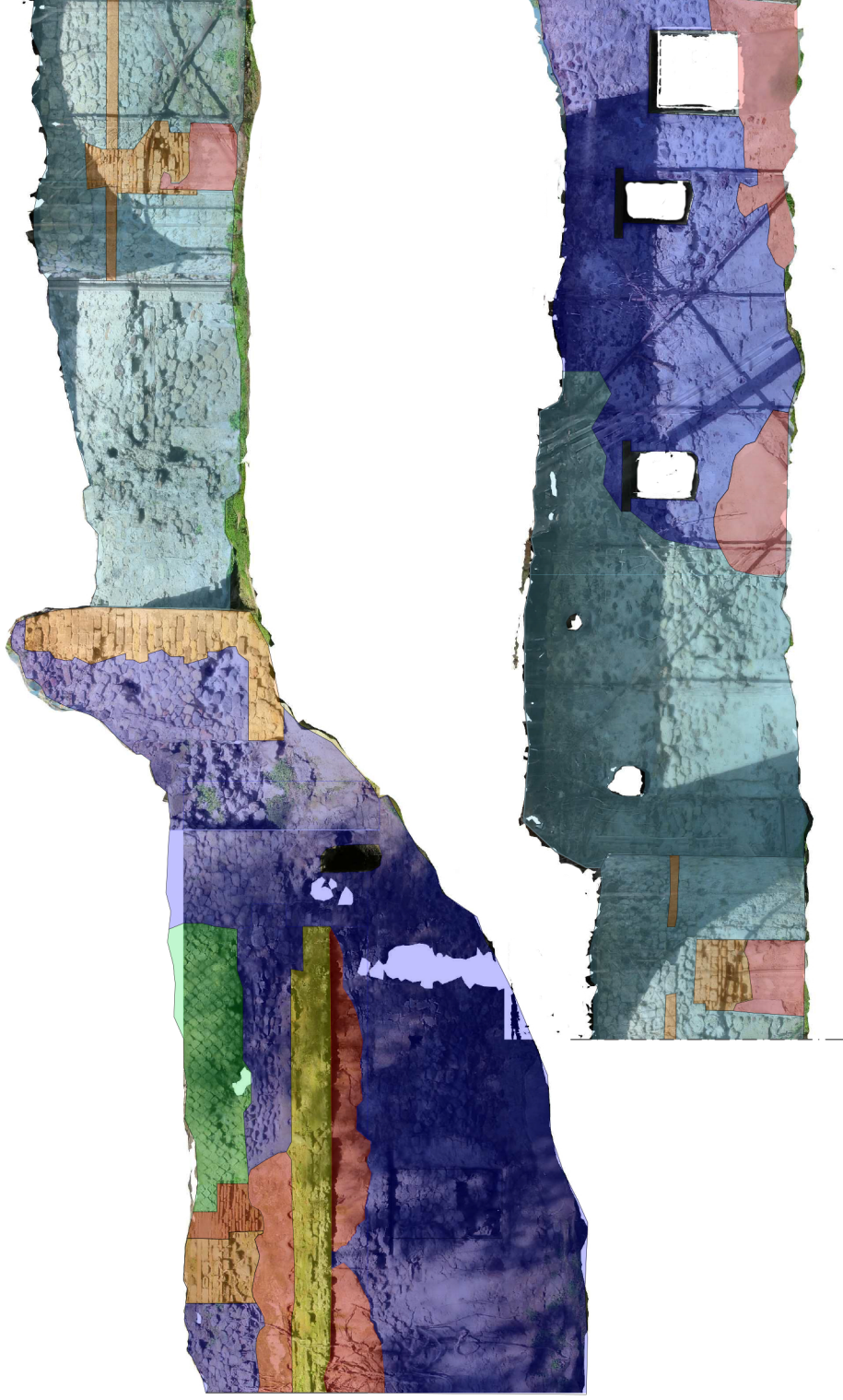
Villa Diomede

B.3.10









RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE

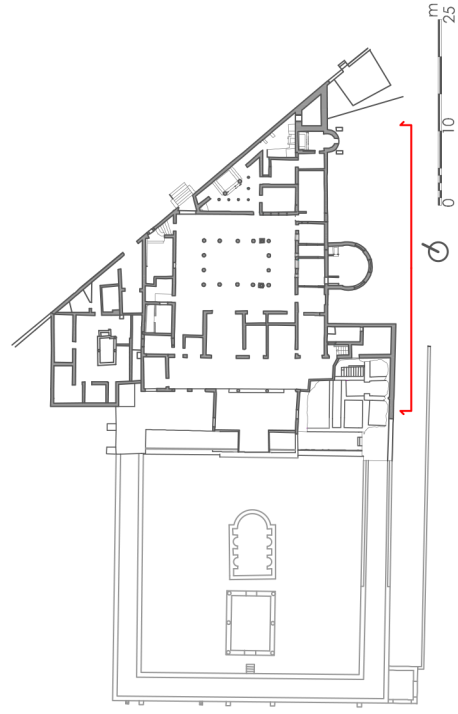
scala 1:100

FACCIATA SUD



LEGENDA:

- | | | | |
|---|---|---|--|
|  | SUPERFICIE COPERTA |  | OPUS LATERICIUM
E OPUS MIXTUM |
|  | OPUS QUADRATUM |  | OPUS RETICOLATUM |
|  | PIETRE SBOZZATE |  | OPUS INCERTUM
GIUNTI DI MALTA DI
ELEVATO SPESSORE |
|  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI PICCOLE DIMENSIONI |  | OPUS INCERTUM
ELEMENTI RESISTENTI
DI GRANDI DIMENSIONI |



Villa Diomede

B.3.11

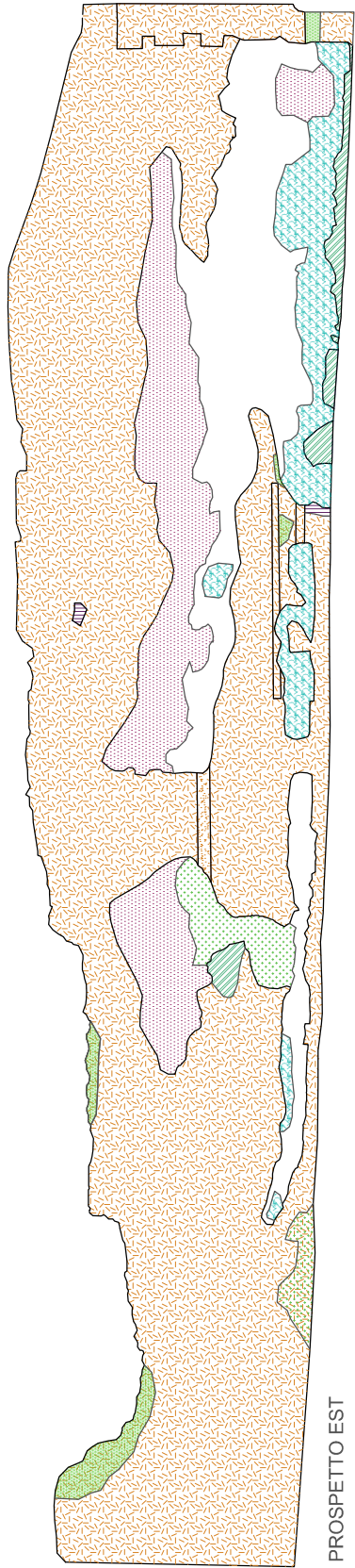
RILIEVO TIPOLOGICO
STRUTTURALE

scala 1:100

FACCIATA SUD

Allegato B.4

Rilievo del degrado

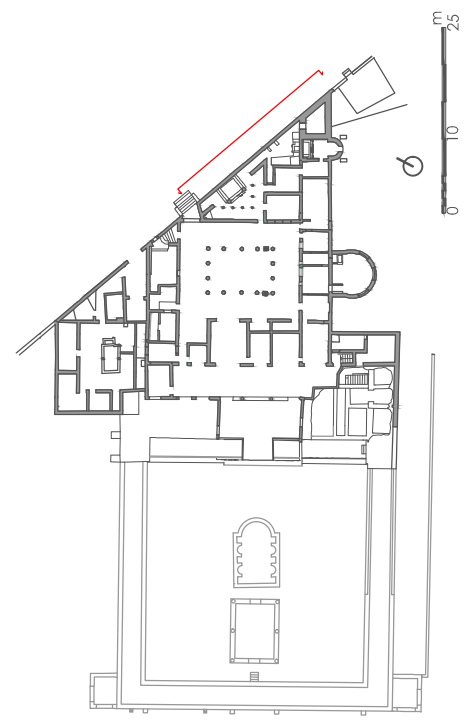


PROSPETTO EST



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | ESFOLIAZIONE |
| | DISGREGAZIONE | | LACUNA |
| | EFFLORESCENZA | | MANCANZA DI VEGETAZIONE |
| | EROSIONE | | |



Villa Diomede

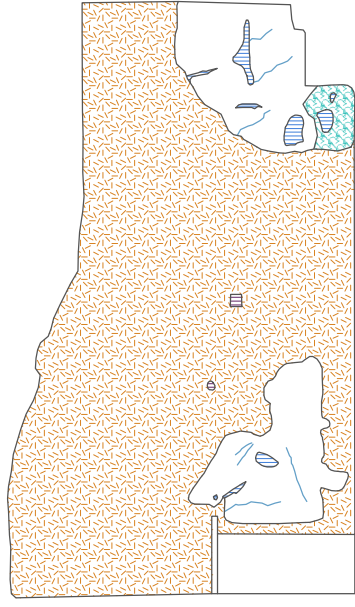
RILIEVO CRITICO

Degrado

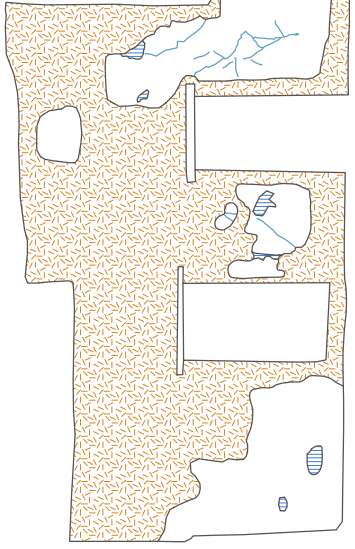
B.4.01

scala 1:100

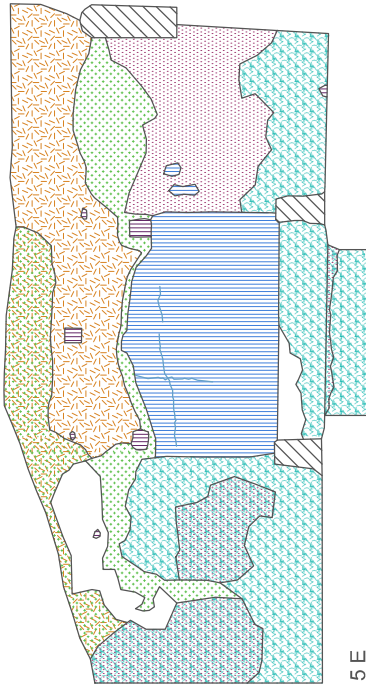
FACCIATA EST



5 W



5 S

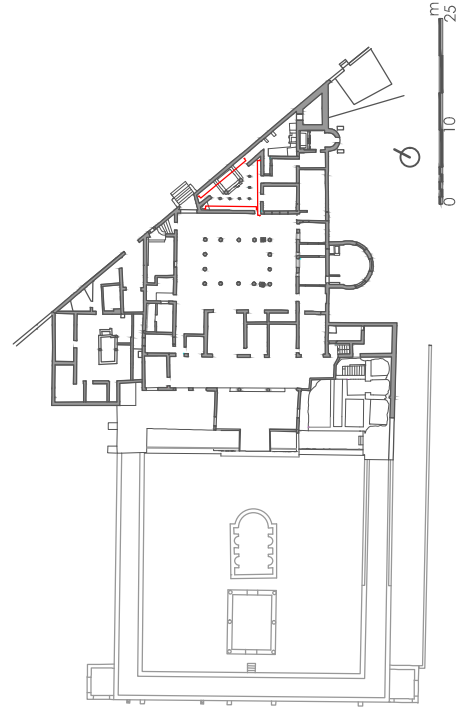


5 E



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA
	ESFOLIAZIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

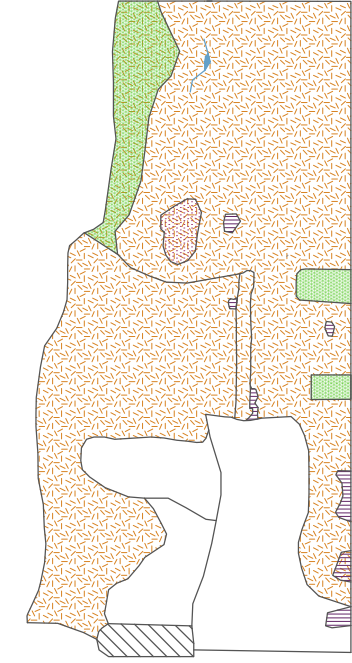
B.4.02

RILIEVO CRITICO

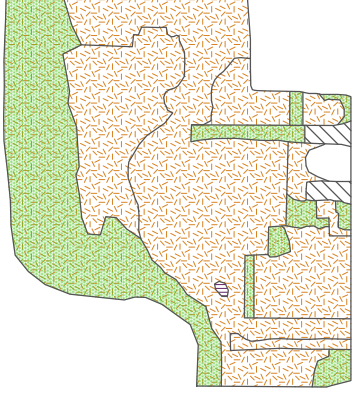
scala 1:100

Degrado

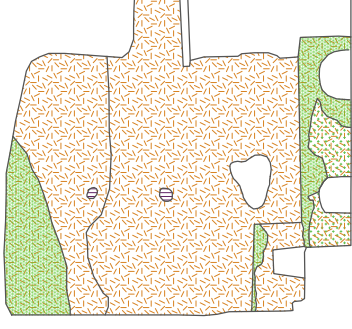
AMBIENTE 5



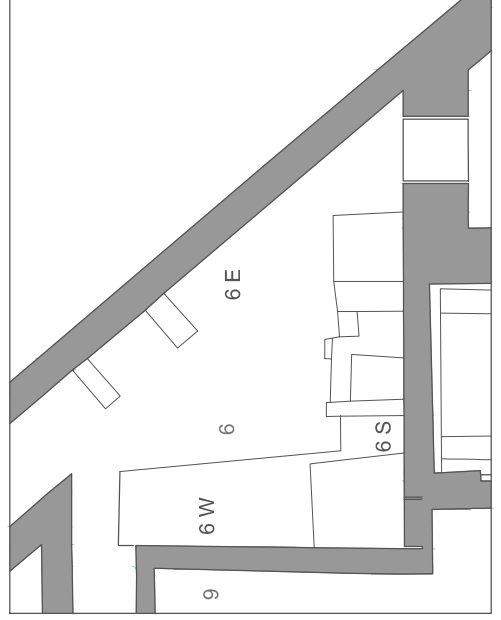
6 E



6 S



6 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA DI VEGETAZIONE
	ESFOLIAZIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE

Villa Diomede

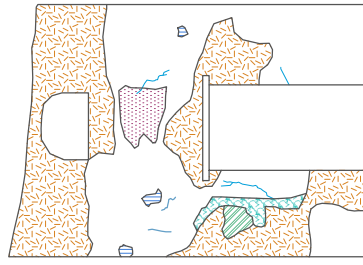
B.4.03

RILIEVO CRITICO

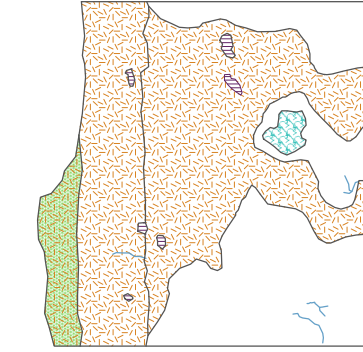
scala 1:100

Degrado

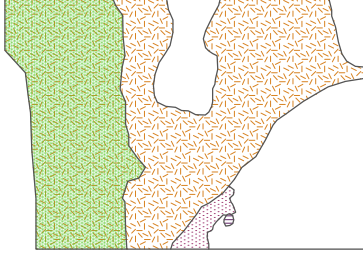
AMBIENTE 6



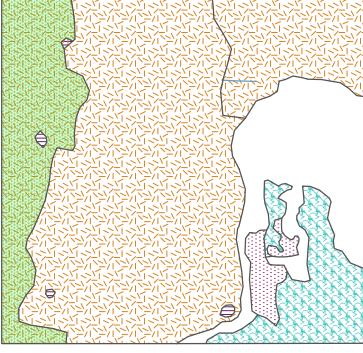
8 N



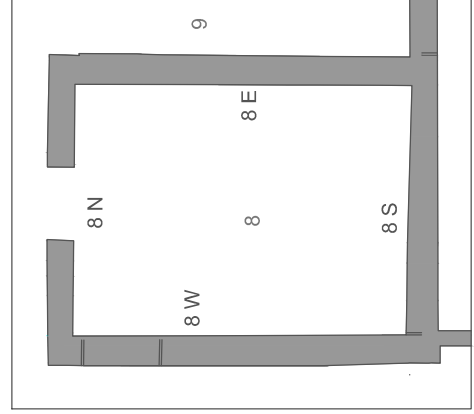
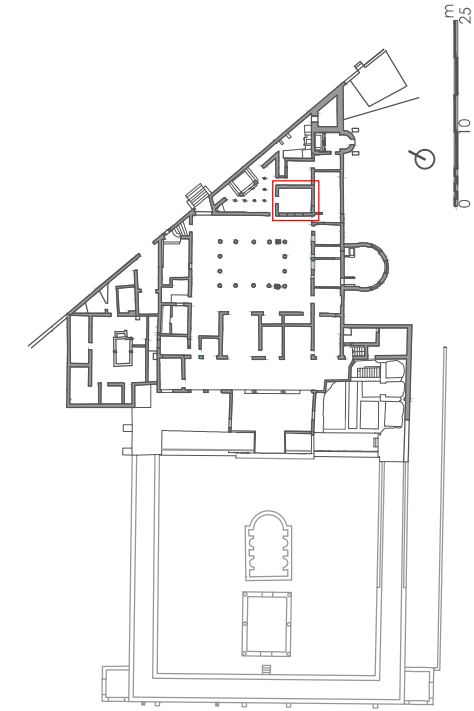
8 E



8 S



8 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	ESFOLIAZIONE		MANCANZA DI VEGETAZIONE
	EROSIONE		

Villa Diomede

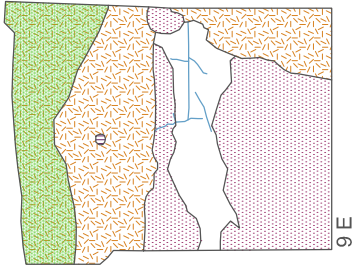
B.4.04

RILIEVO CRITICO

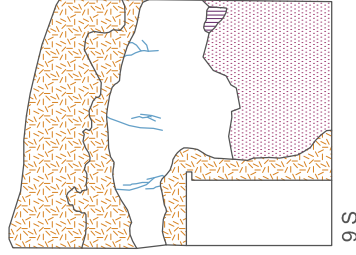
scala 1:100

Degrado

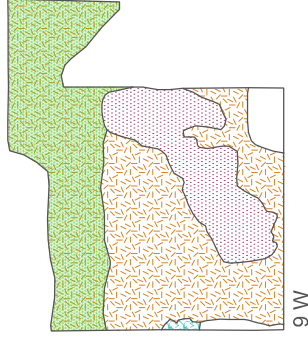
AMBIENTE 8



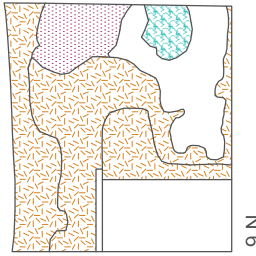
9 E



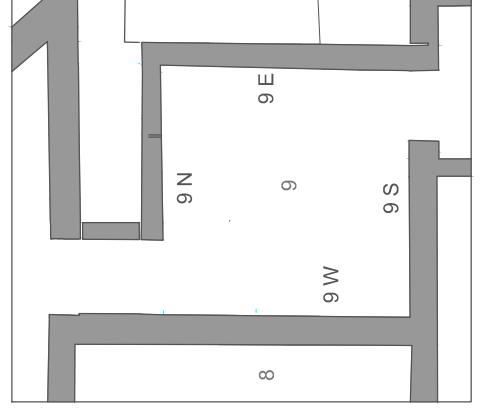
9 S



9 W



9 N



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | FESSURAZIONE |
| | DISGREGAZIONE | | LACUNA |
| | ESFOLIAZIONE | | MANCANZA |
| | EROSIONE | | PRESENZA DI VEGETAZIONE |

Villa Diomede

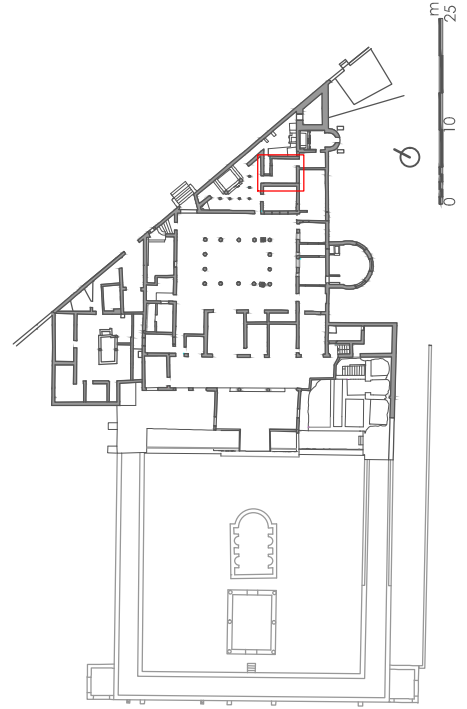
B.4.05

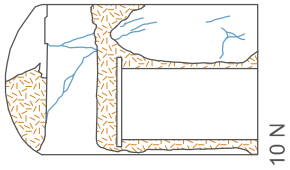
RILIEVO CRITICO

scala 1:100

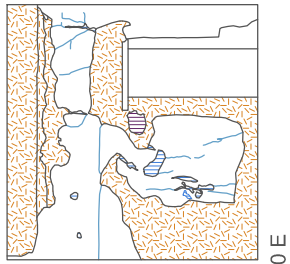
Degrado

AMBIENTE 9

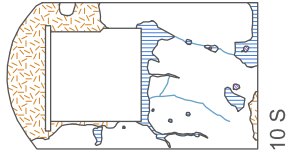




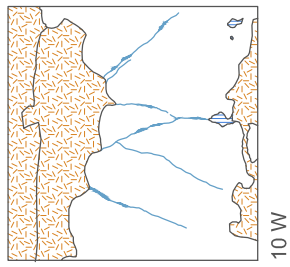
10 N



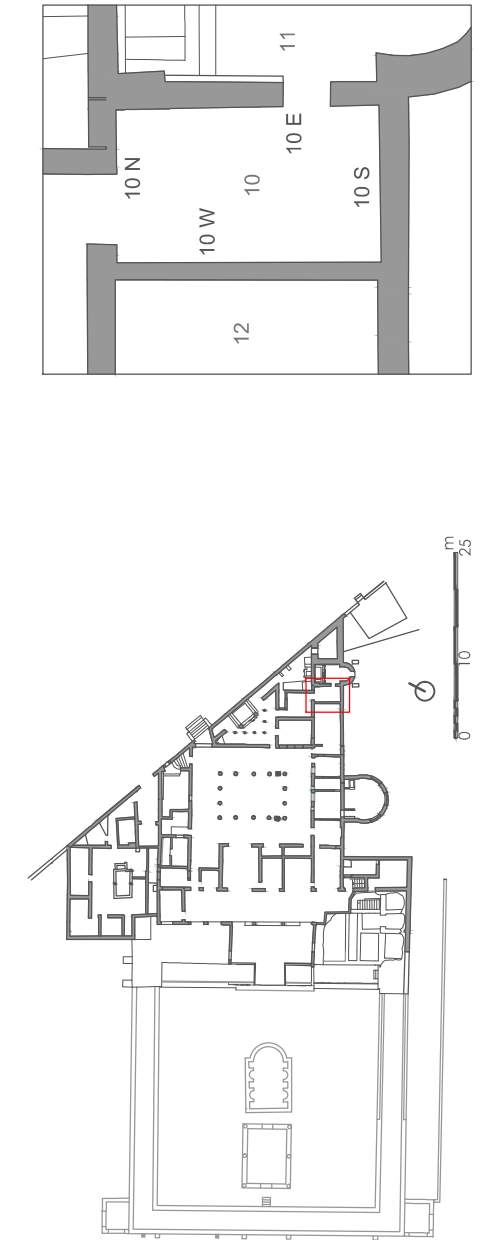
10 E



10 S



10 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA
	ESFOLIAZIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE

Villa Diomede

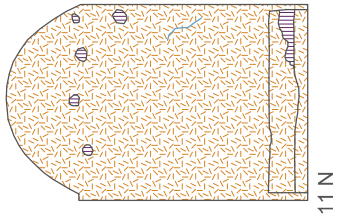
B.4.06

RILIEVO CRITICO

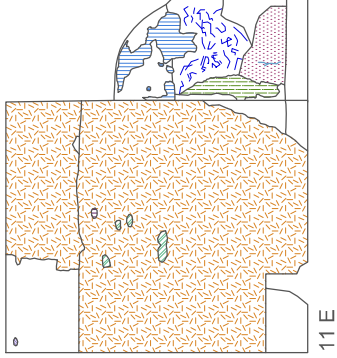
scala 1:100

Degrado

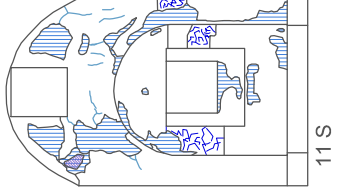
AMBIENTE 10



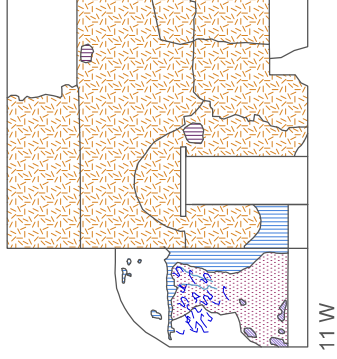
11 N



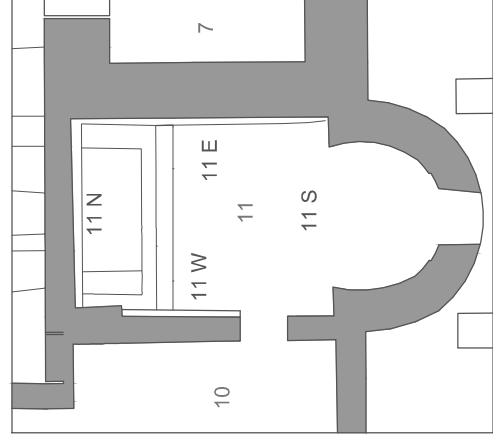
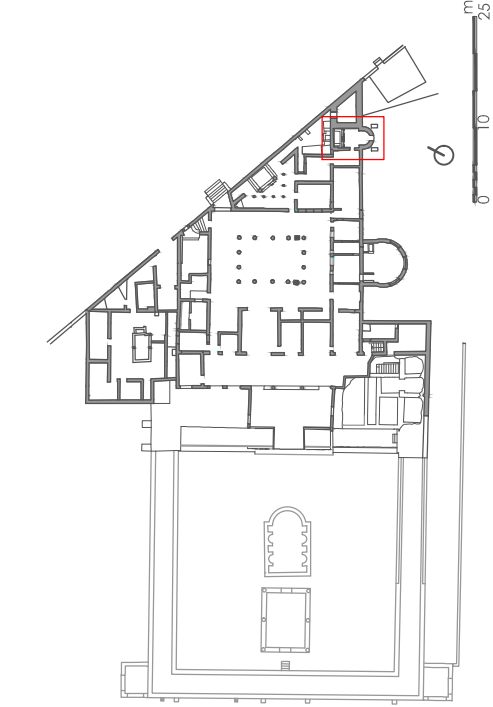
11 E



11 S



11 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MACCHIA
	EROSIONE		MANCANZA
	GRAFFITO VANDALICO		PRESENZA DI VEGETAZIONE

Villa Diomede

B.4.07

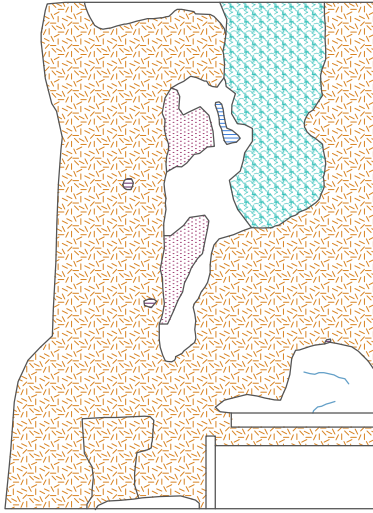
RILIEVO CRITICO

scala 1:100

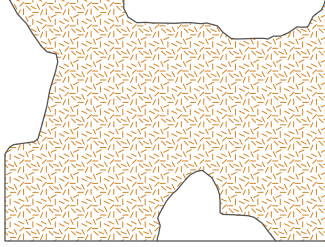
Degrado

AMBIENTE 11

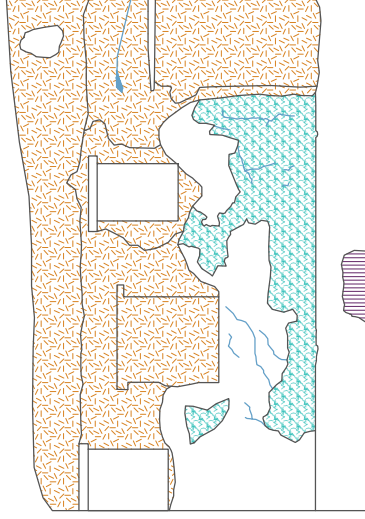




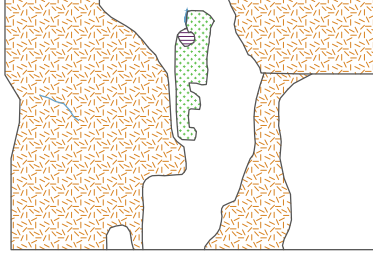
12 N



12 E



12 S

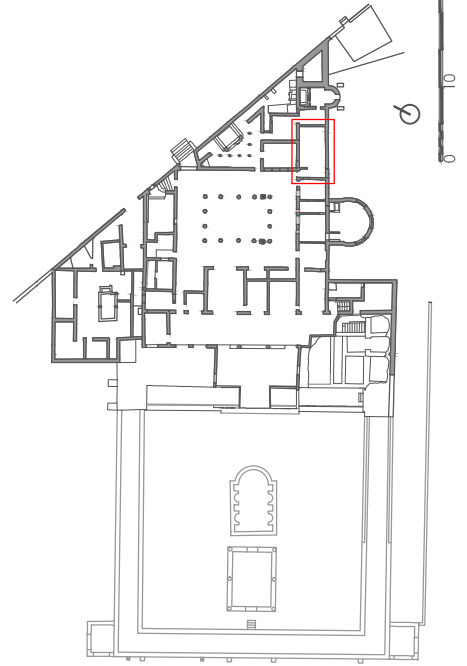
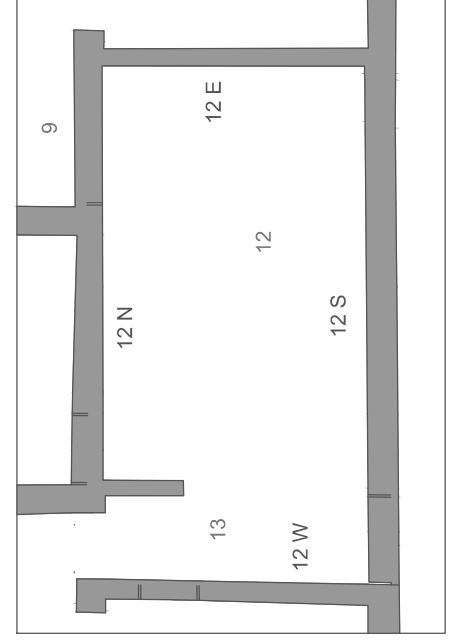


12 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA DI VEGETAZIONE
	ESFOLIAZIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

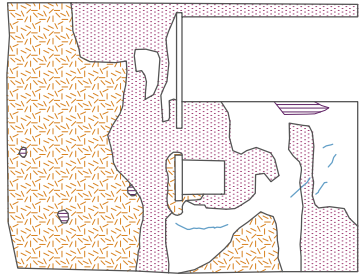
B.4.08

RILIEVO CRITICO

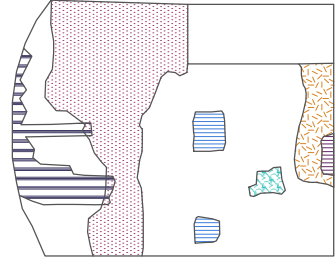
scala 1:100

Degrado

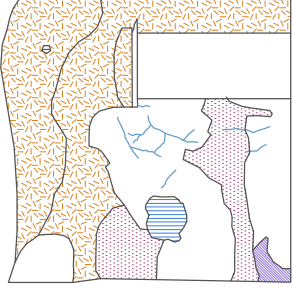
AMBIENTE 12



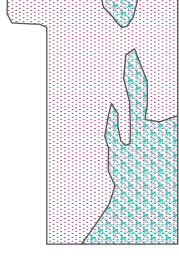
16 N



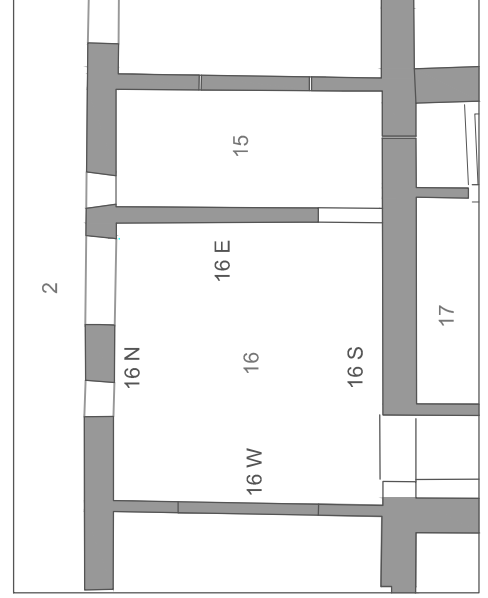
16 E



16 S



16 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	COLATURA		FESSURAZIONE
	CROSTA		LACUNA
	DISGREGAZIONE		MACCHIA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA

Villa Diomede

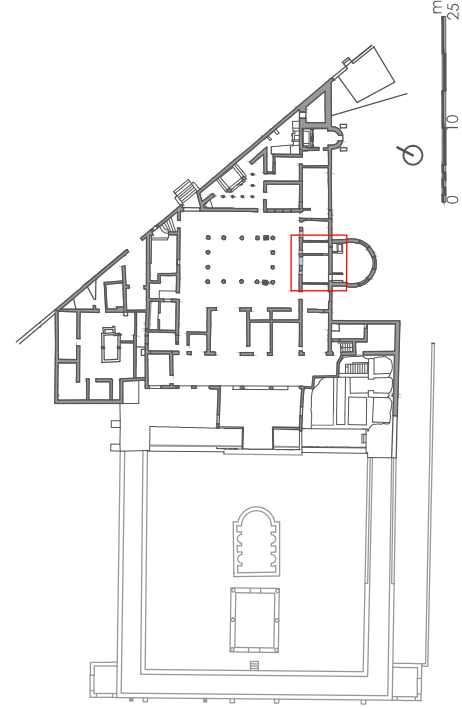
B.4.09

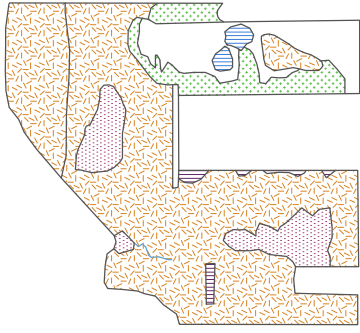
RILIEVO CRITICO

scala 1:100

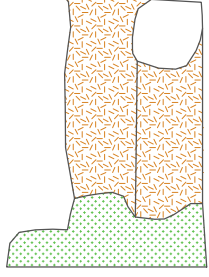
Degrado

AMBIENTE 16

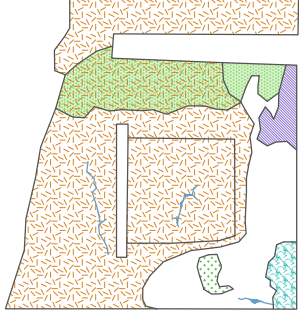




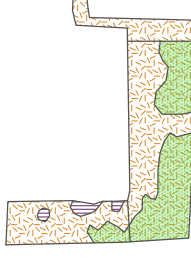
18 N



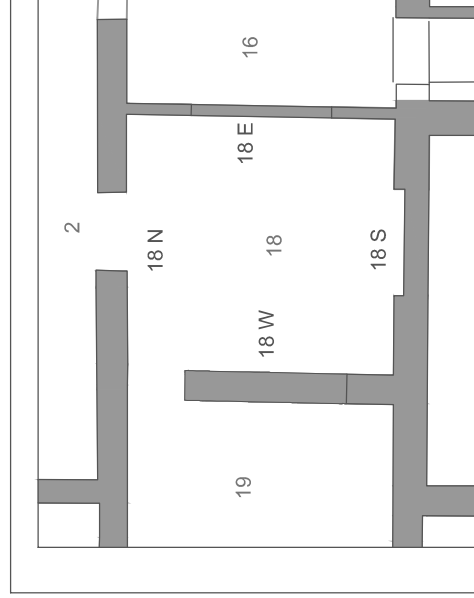
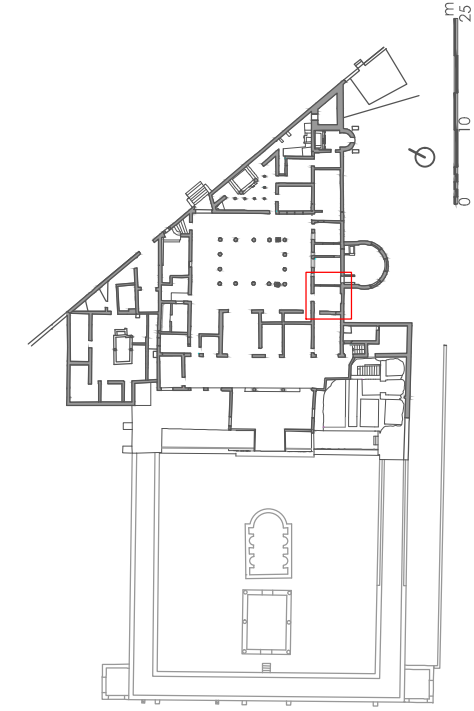
18 E



18 S



18 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | LACUNA |
| | DISGREGAZIONE | | MACCHIA |
| | EFFLORESCENZA | | MANCANZA |
| | ESFOLIAZIONE | | PRESENZA DI VEGETAZIONE |

Villa Diomede

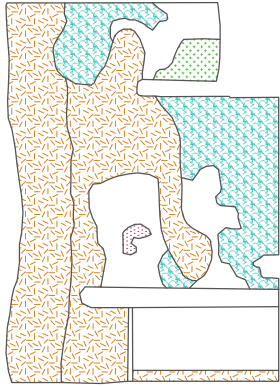
B.4.10

RILIEVO CRITICO

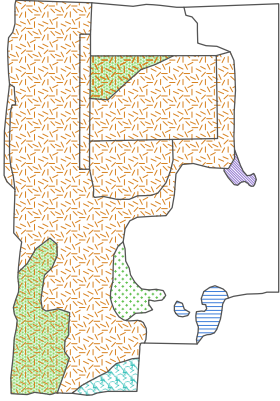
scala 1:100

Degrado

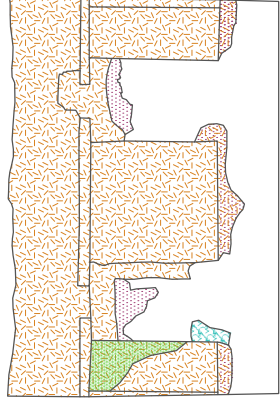
AMBIENTE 18



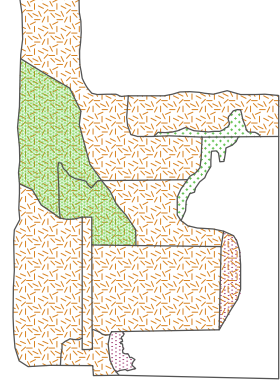
17 N



17 E



17 S

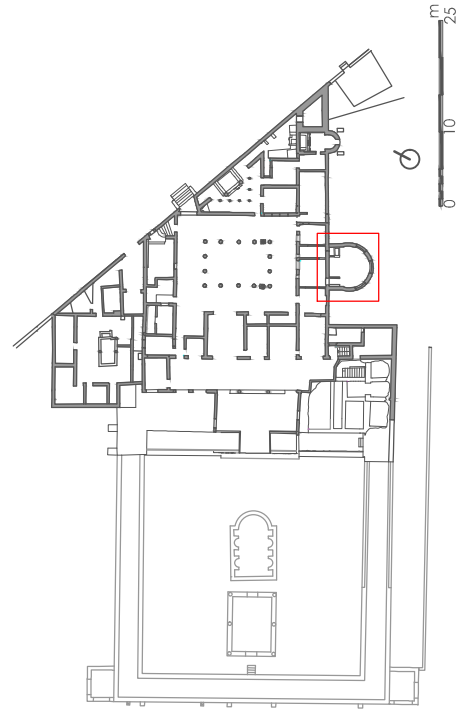
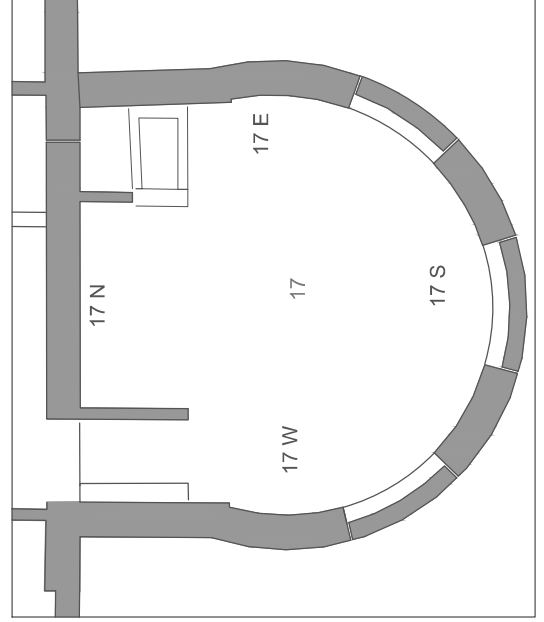


17 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | FESSURAZIONE |
| | DISGREGAZIONE | | LACUNA |
| | EFFLORESCENZA | | MACCHIA |
| | ESFOLIAZIONE | | PRESENZA DI VEGETAZIONE |



B.4.11

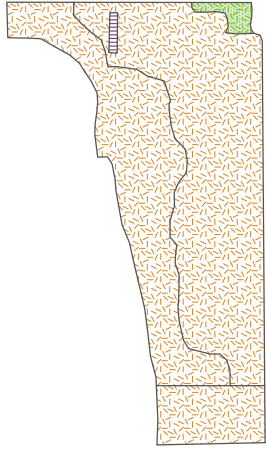
Villa Diomede

RILIEVO CRITICO

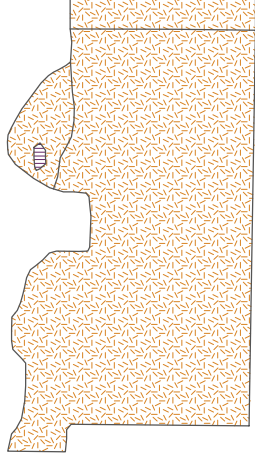
Degrado

scala 1:100

AMBIENTE 17



19 A

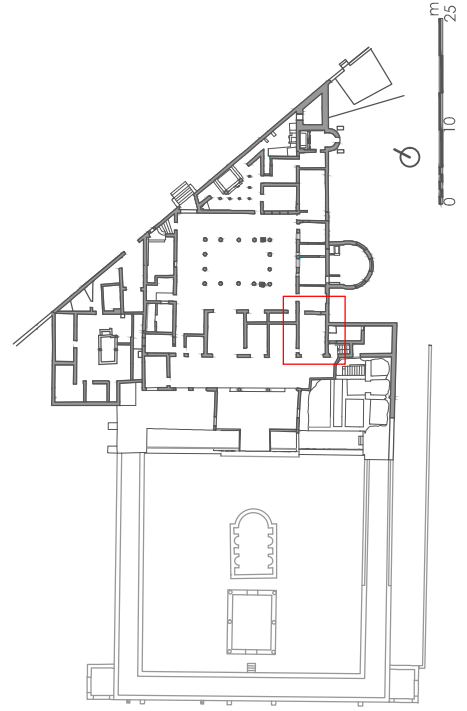
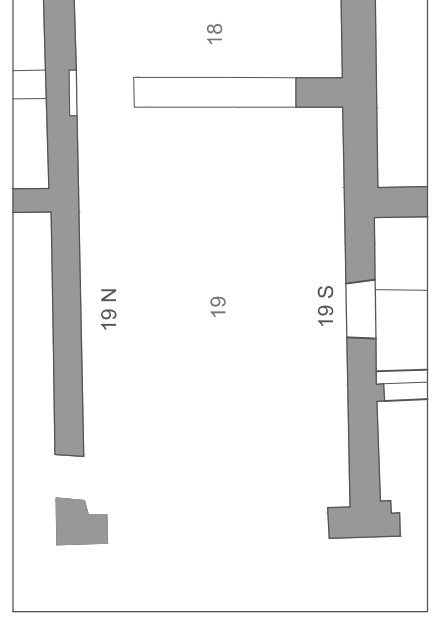


19 C



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MACCHIA
	ESFOLIAZIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

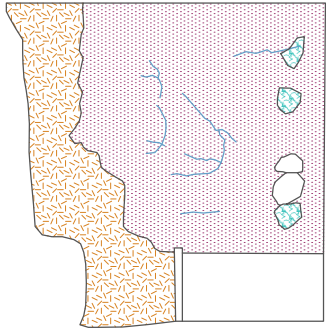
B.4.12

scala 1:100

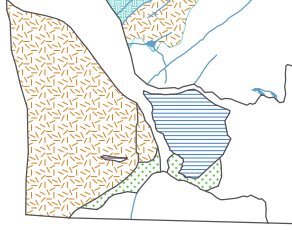
RILIEVO CRITICO

Degrado

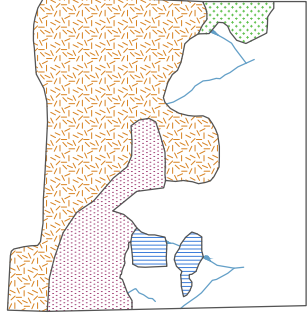
AMBIENTE 19



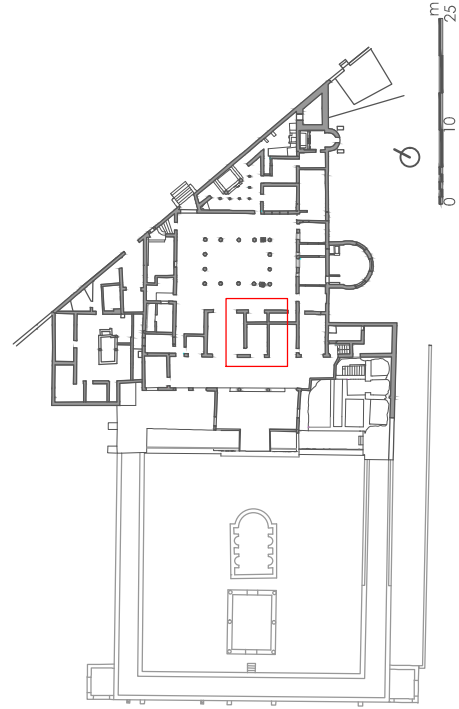
35 N



35 E



35 S



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | FESSURAZIONE |
| | DISGREGAZIONE | | LACUNA |
| | EFFLORESCENZA | | MACCHIA |
| | ESFOLIAZIONE | | PRESENZA DI VEGETAZIONE |

Villa Diomede

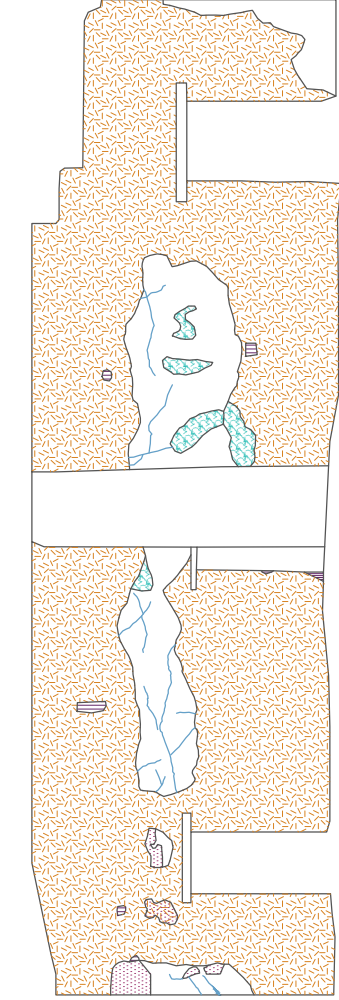
B.4.13

RILIEVO CRITICO

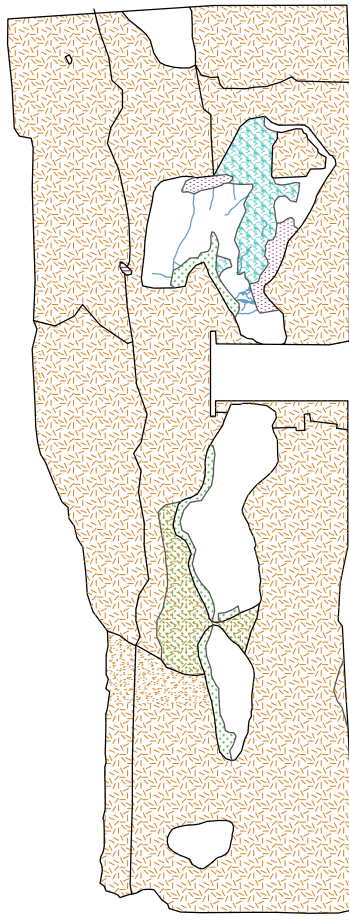
scala 1:100

Degrado

AMBIENTE 35



2 N

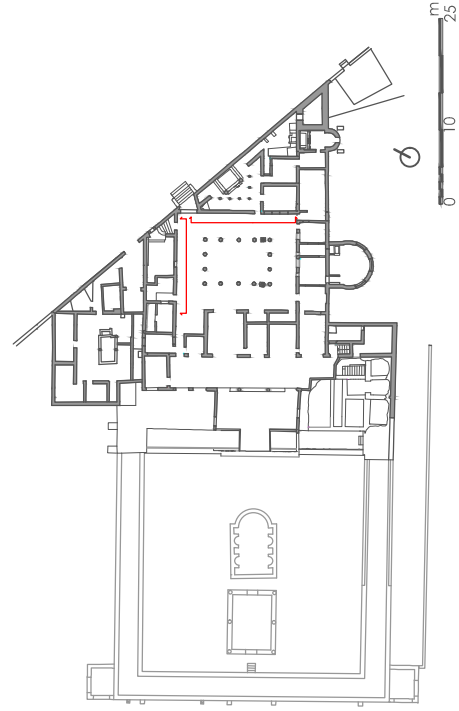


2 E



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		FESSURAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA
	ESFOLIAZIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

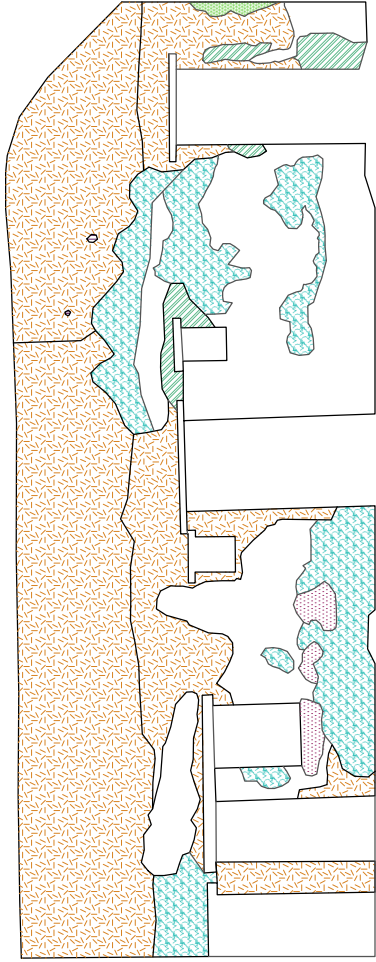
B.4.14

RILIEVO CRITICO

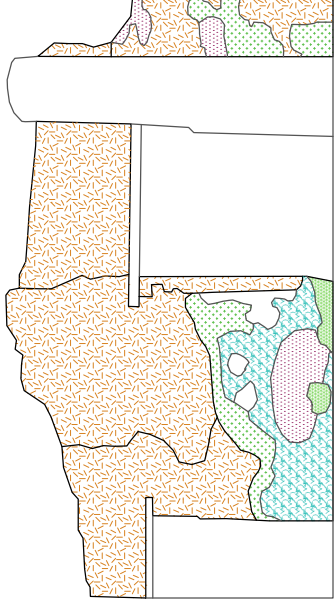
scala 1:100

Degrado

PERISTILIO



2 S

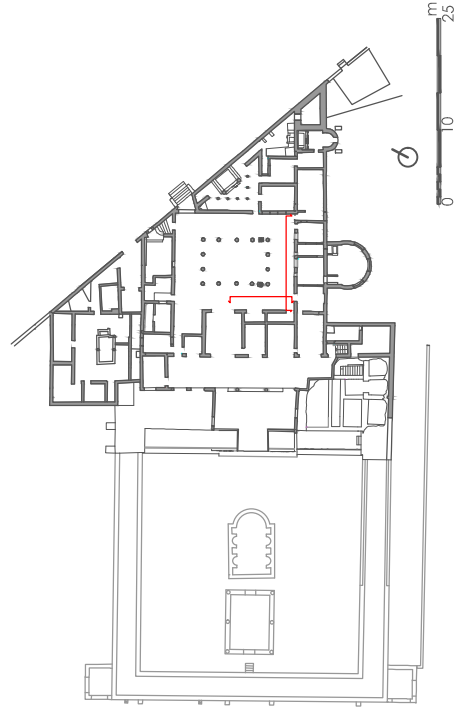


2 W



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		ESFOLIAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA
	EROSIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

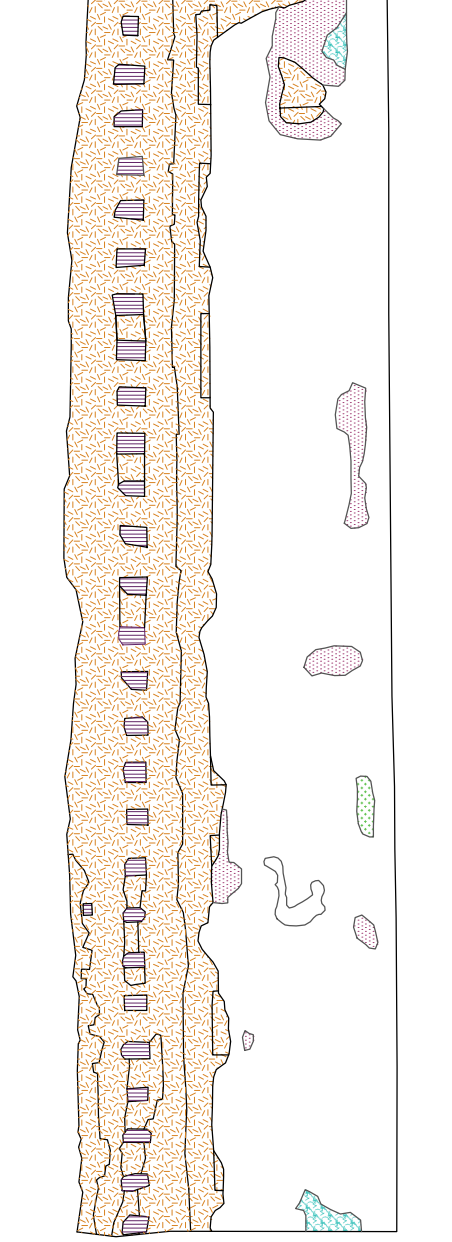
B.4.15

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

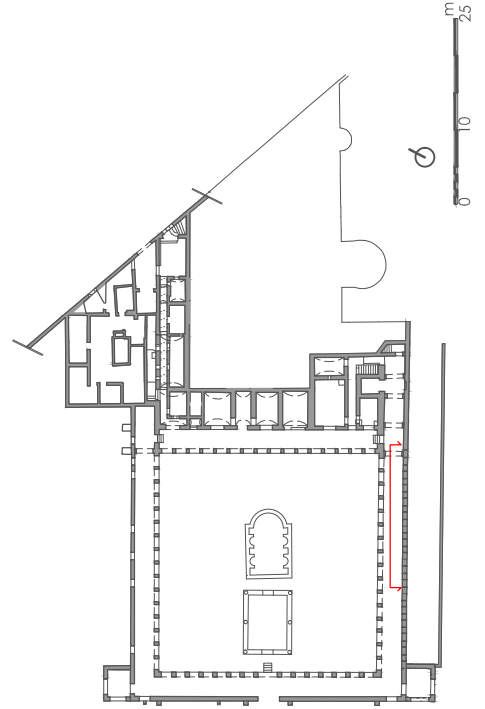
Degrado

PERISTILIO



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		ESFOLIAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA
	EROSIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

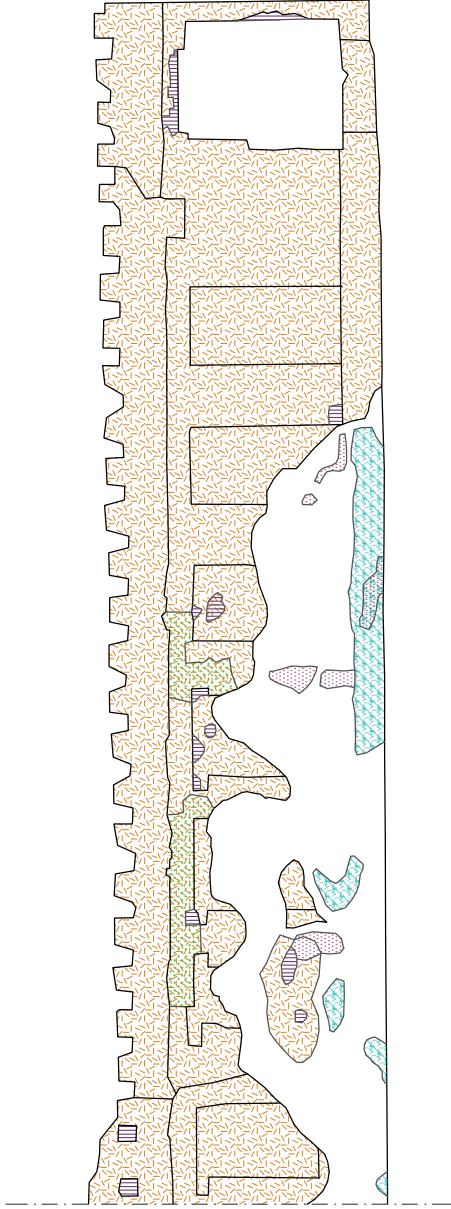
B.4.16

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

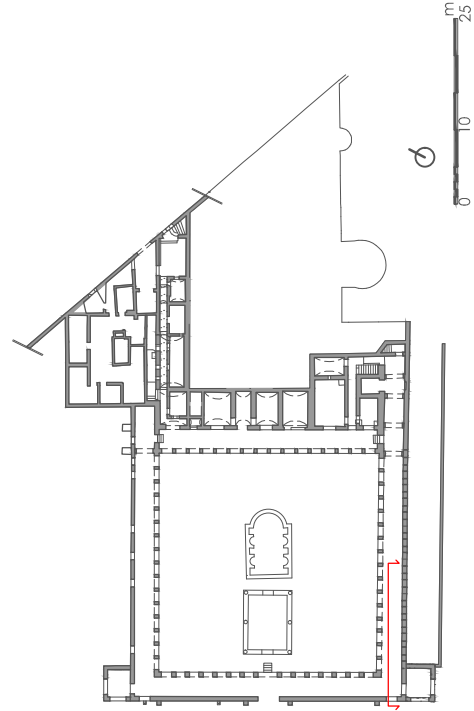
Degrado

MURO SUD



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		ESFOLIAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA DI VEGETAZIONE
	EROSIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

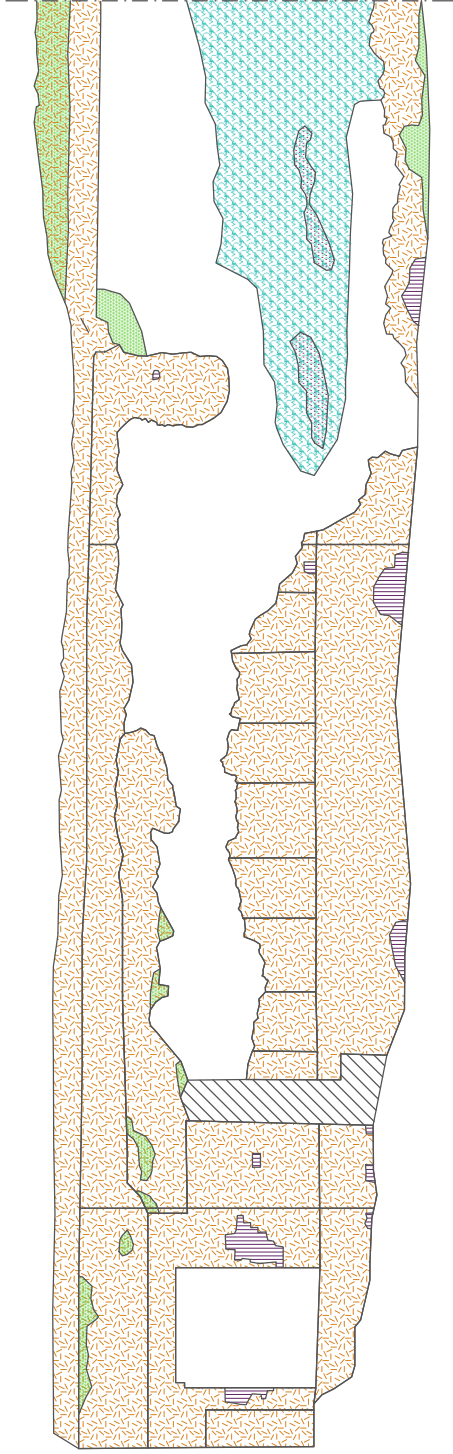
B.4.17

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

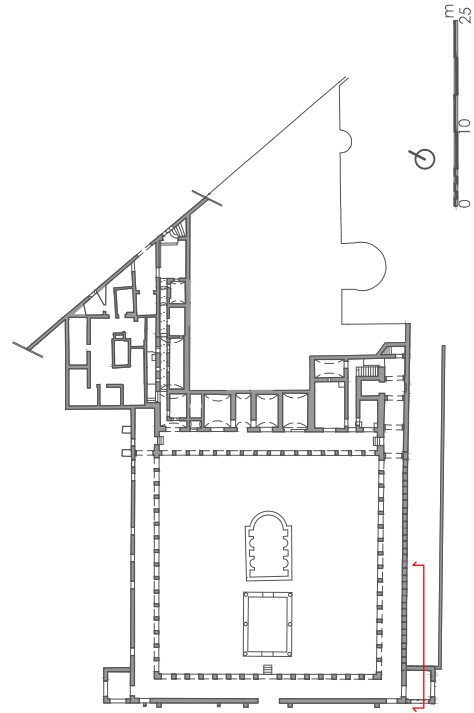
Degrado





LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | ESFOLIAZIONE |
| | DISGREGAZIONE | | LACUNA |
| | EFFLORESCENZA | | MANCANZA DI VEGETAZIONE |
| | EROSIONE | | PRESENZA DI VEGETAZIONE |



Villa Diomede

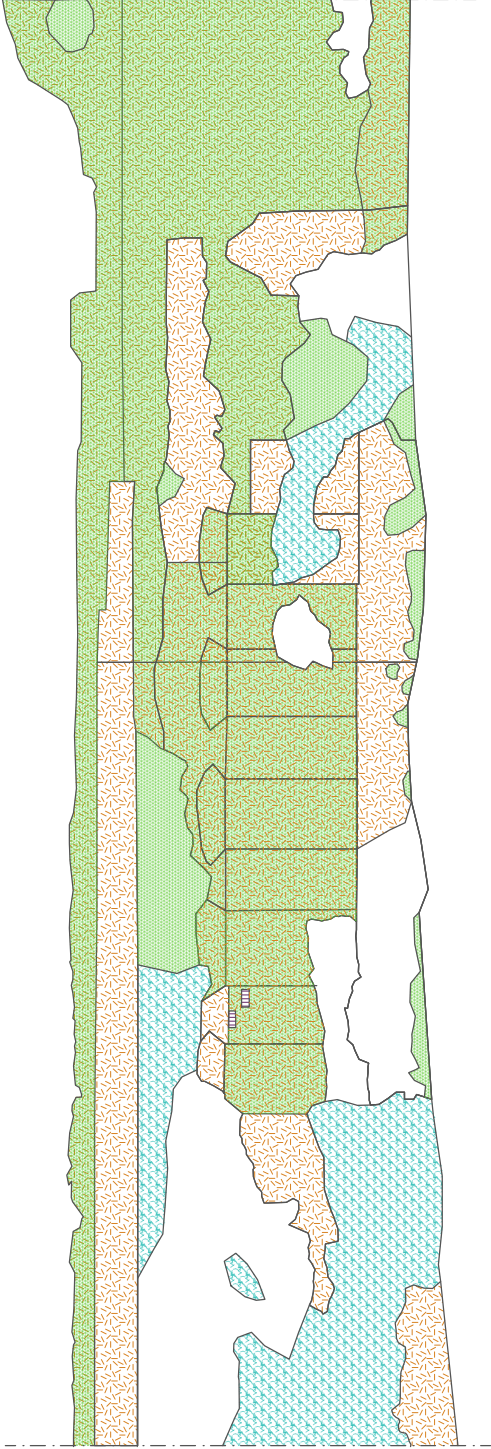
B.4.18

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

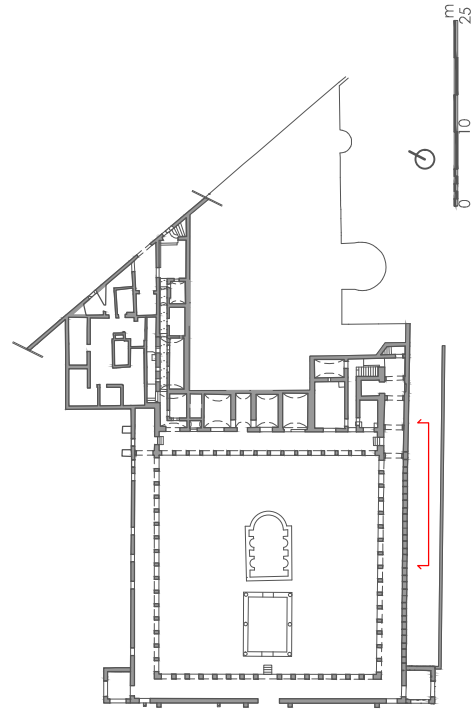
Degrado

FACCIATA SUD



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

- | | | | |
|--|---------------|--|-------------------------|
| | CROSTA | | ESFOLIAZIONE |
| | DISGREGAZIONE | | LACUNA |
| | EFFLORESCENZA | | MANCANZA |
| | EROSIONE | | PRESENZA DI VEGETAZIONE |



Villa Diomede

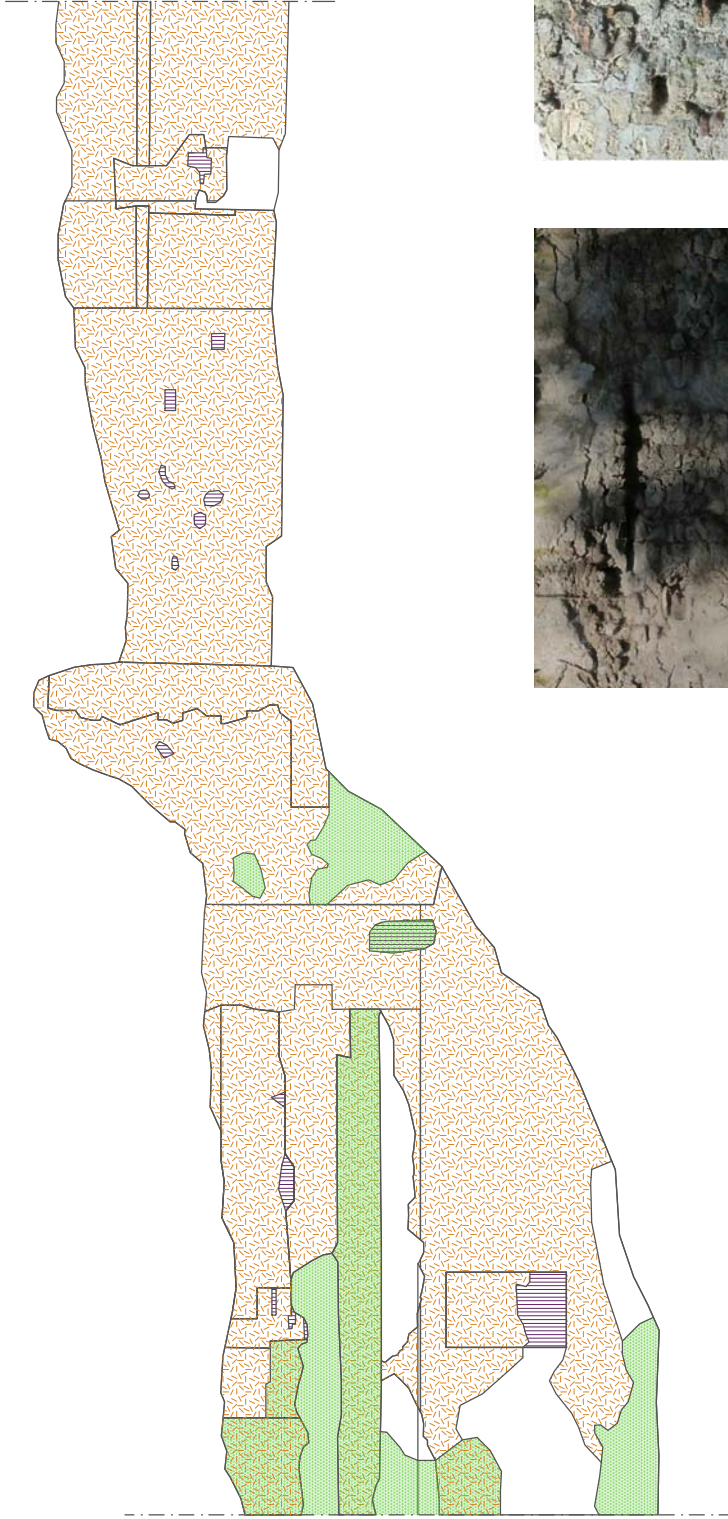
B.4.19

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

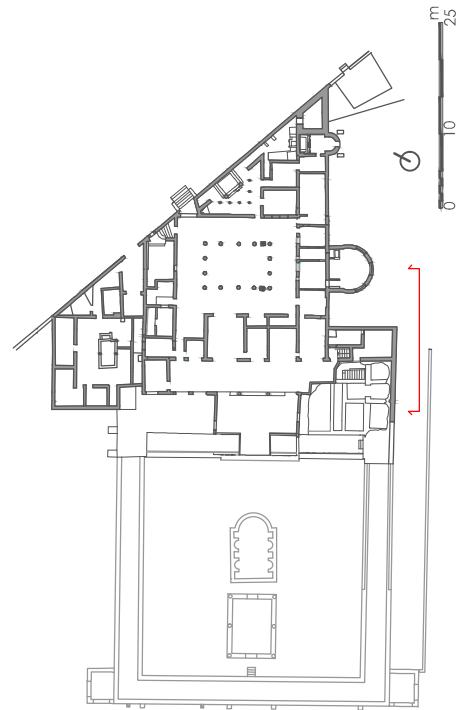
Degrado

FACCIATA SUD



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		ESFOLIAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA DI VEGETAZIONE
	EROSIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

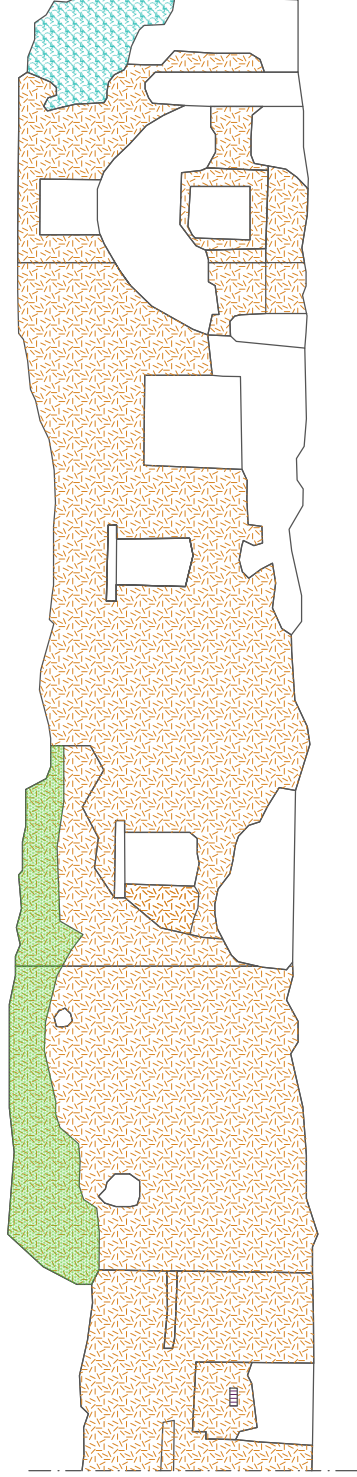
B.4.20

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

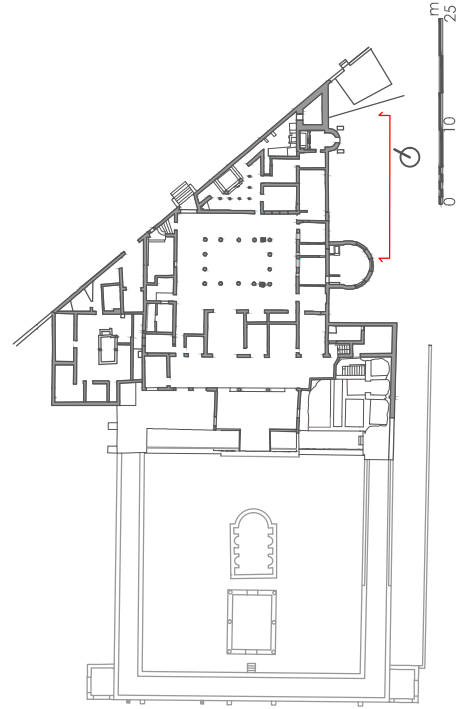
Degrado

FACCIATA SUD



LEGENDA: Degrado macroscopico dei materiali Normal 1/88

	CROSTA		ESFOLIAZIONE
	DISGREGAZIONE		LACUNA
	EFFLORESCENZA		MANCANZA DI VEGETAZIONE
	EROSIONE		PRESENZA DI VEGETAZIONE



Villa Diomede

B.4.21

RILIEVO CRITICO

scala 1:100

Degrado

FACCIATA SUD

Allegato B.5
Quadro fessurativo



1 Rifacimenti in mattoni



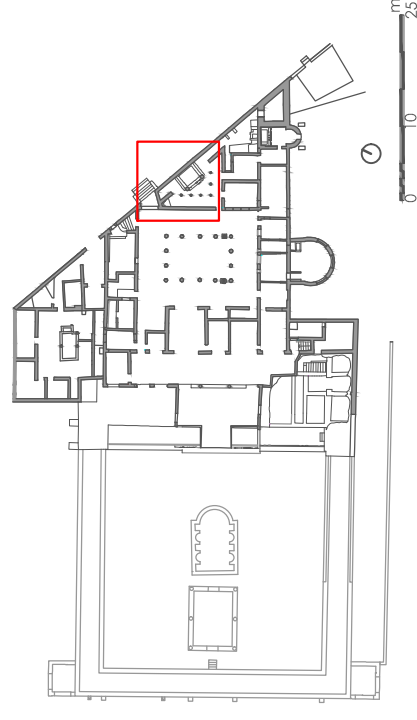
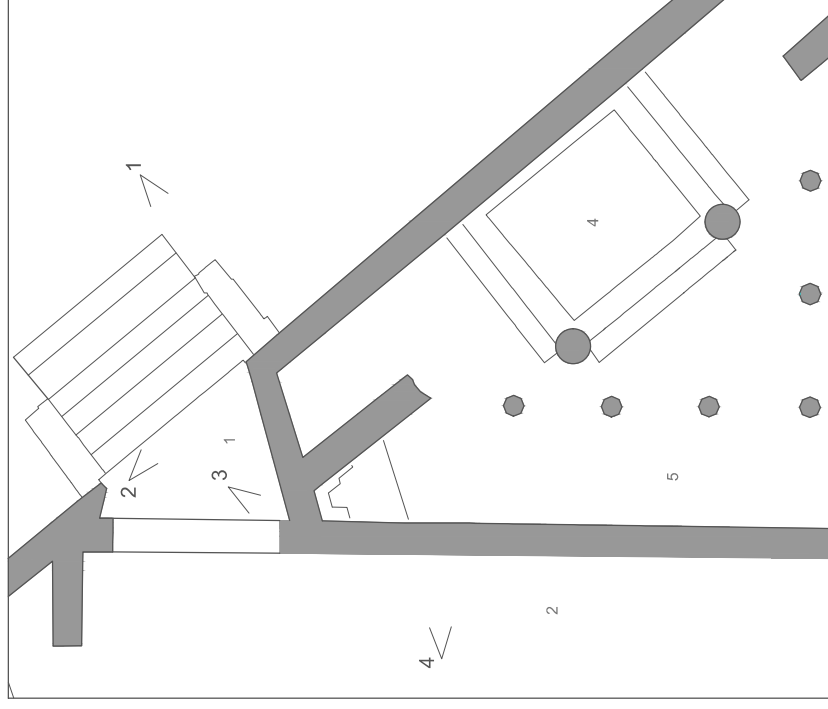
2 Assenza di ammassamento



3 Lesione (media)



4 Lesione (piccola)



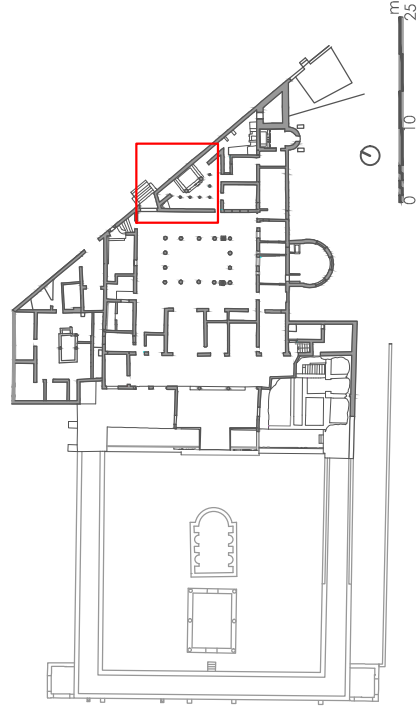
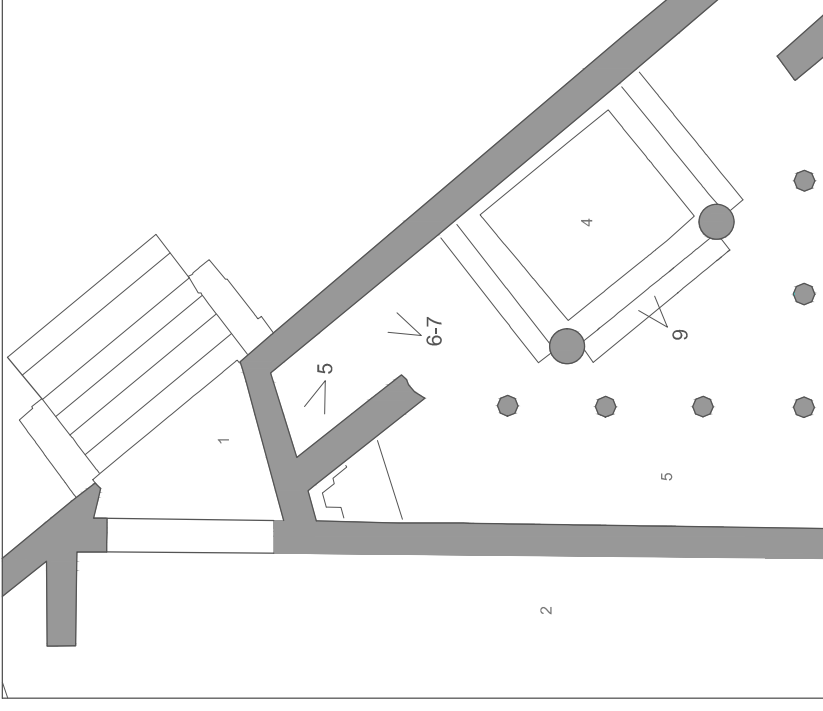
Villa Diomede

B.5.01

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

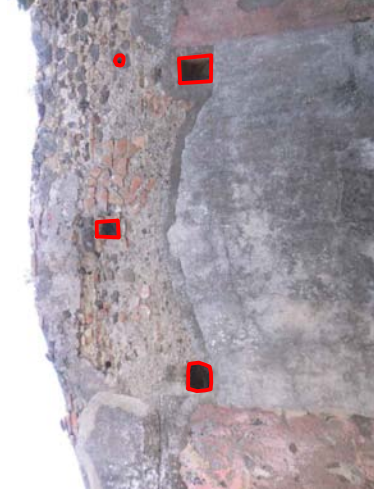
AMBIENTI 1-2



Villa Diomede
B.5.02
 QUADRO FESSURATIVO
 scala 1:100
 AMBIENTE 5



6 Lesione (media)



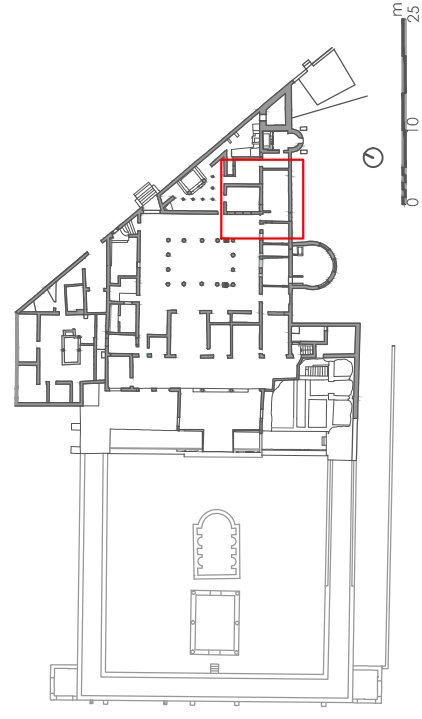
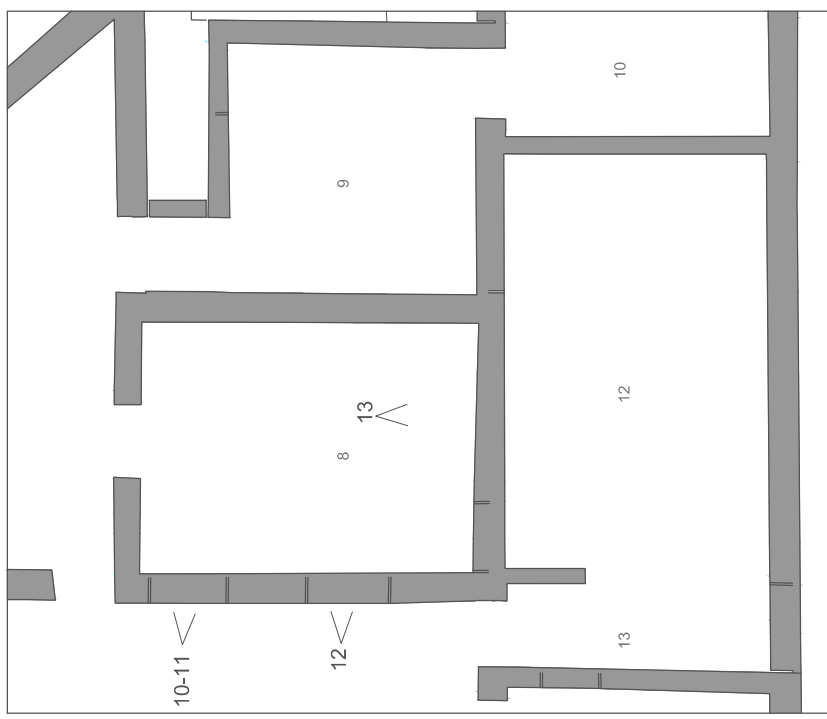
9 Cavita



5 Lesione (media)



7 Lesione (media)



Villa Diomede
B.5.03
 QUADRO FESSURATIVO
 scala 1:100
 AMBIENTI 2-8



11 Tamponamento



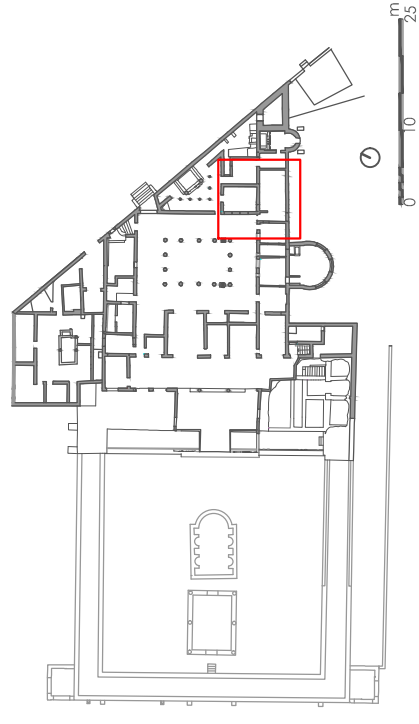
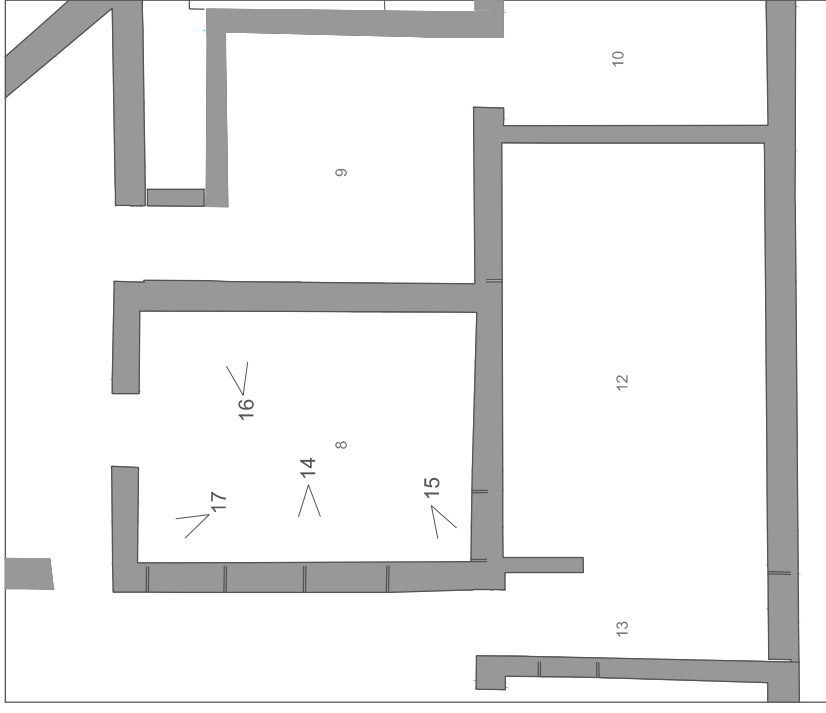
13 Cavità e mancanze



10 Cavità



12 Tamponamento



Villa Diomede

B.5.04

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

AMBIENTE 8



15 Lesione (media)



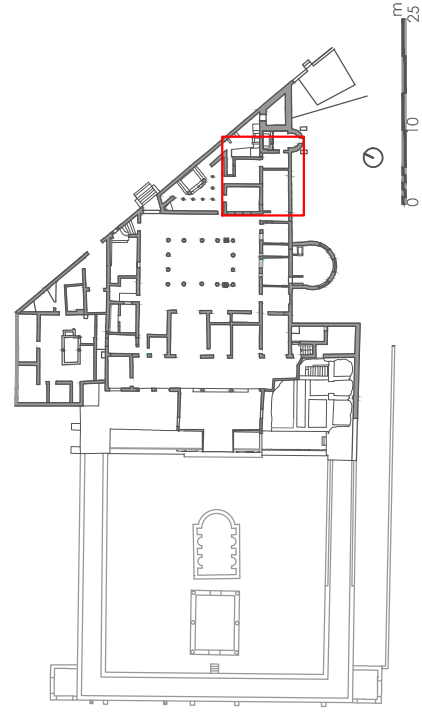
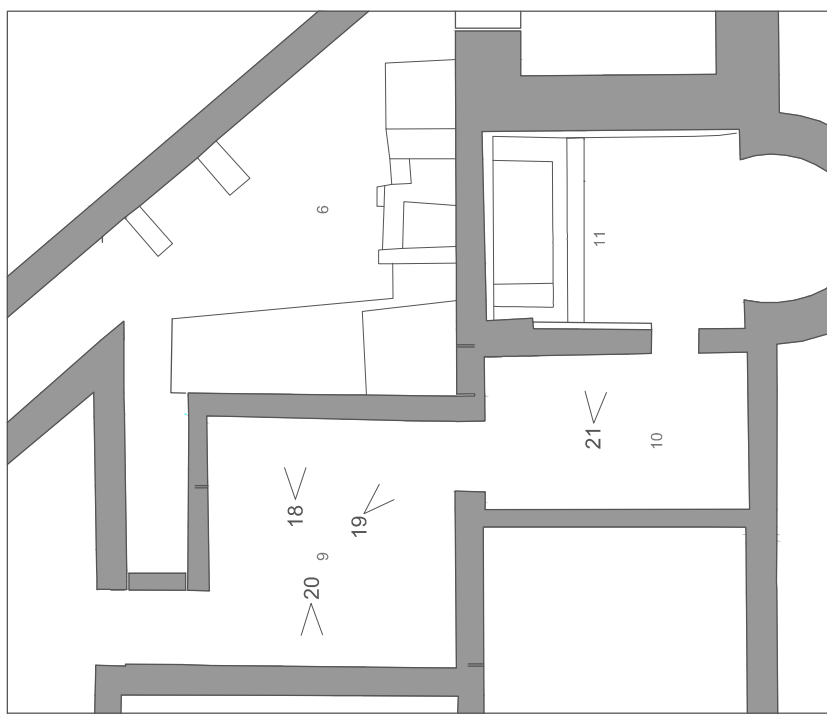
17 Assenza di ammassamento



14 Cavità



16 Manzanne



Villa Diomede
B.5.05
 QUADRO FESSURATIVO
 scala 1:100
 AMBIENTI 9-10



19 Cavità



21 Cavità



18 Cavità



20 Lesione (media)



22 Cavità



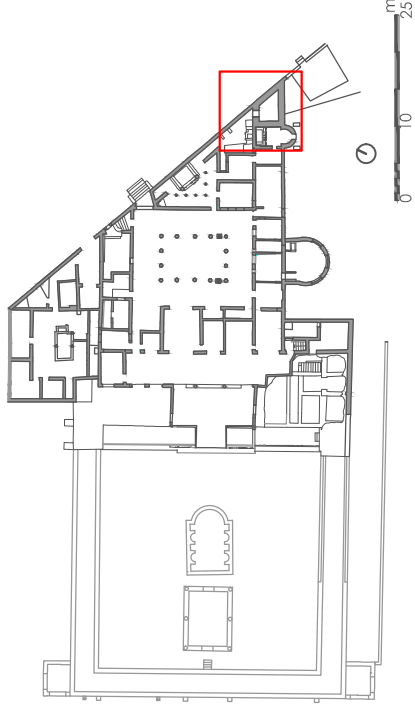
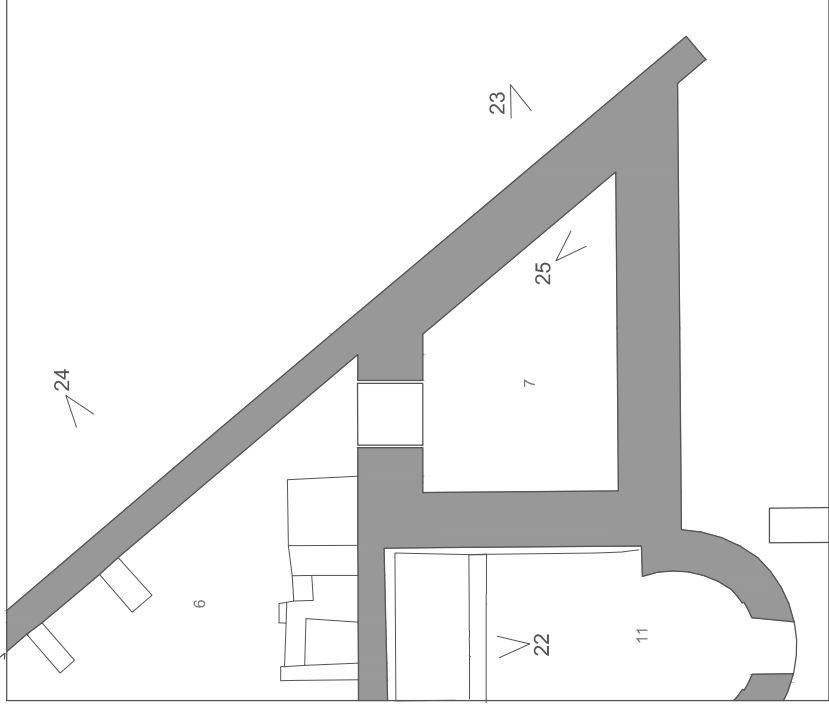
24 Lesione orizzontale (media)



23 Lesione



25 Assenza di ammassamento



Villa Diomede

B.5.06

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

AMBIENTI 7-11



30 Assenza di ammortamento



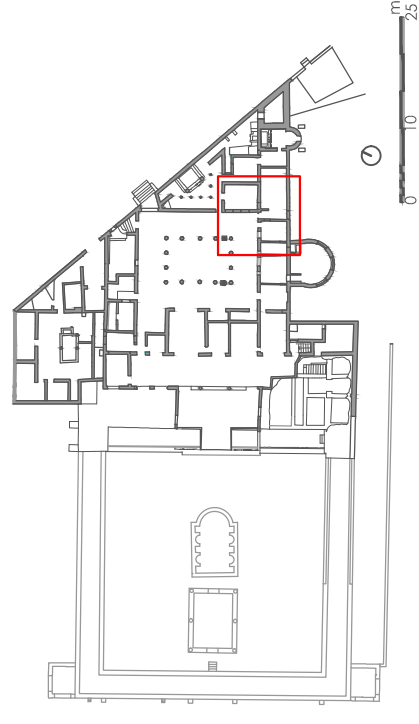
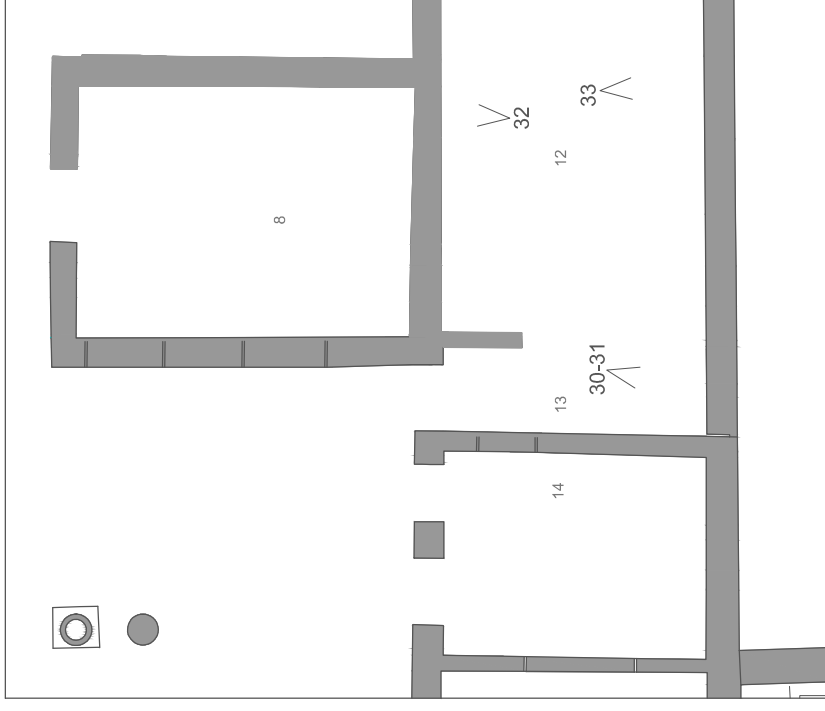
31 Tamponamento



32 Cavità



33 Tamponamento



Villa Diomede

B.5.07

scala 1:100

QUADRO FESSURATIVO

AMBIENTI 12-13



26 Tamponamento



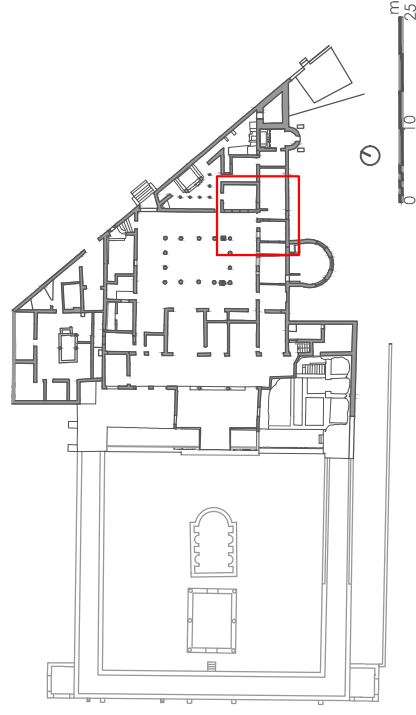
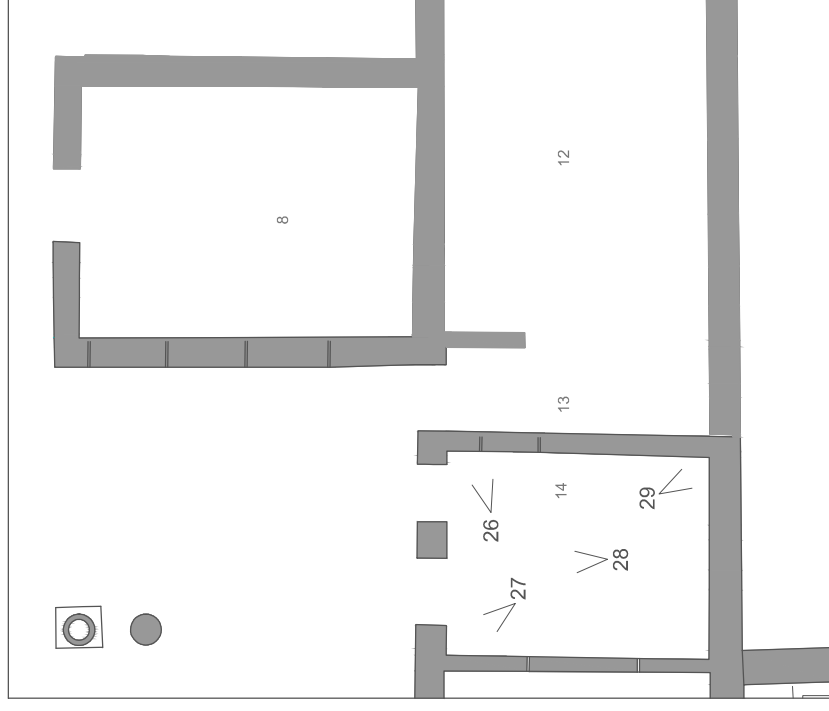
27 Assenza di ammassamento



28 Cavità e mancanze



29 Assenza di ammassamento, distacco delle pareti



Villa Diomede

B.5.08

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

AMBIENTE 5



35 Tamponamento



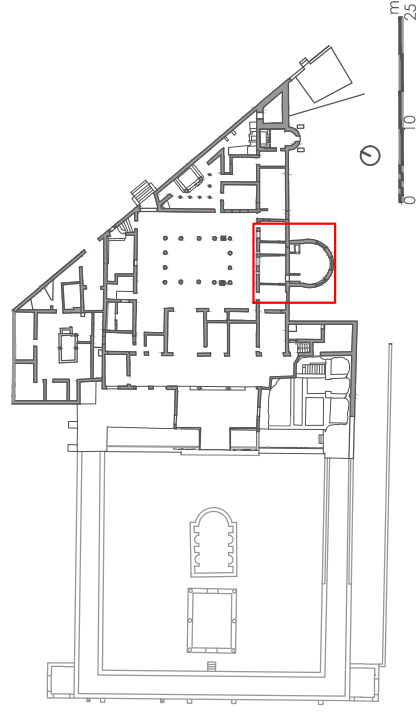
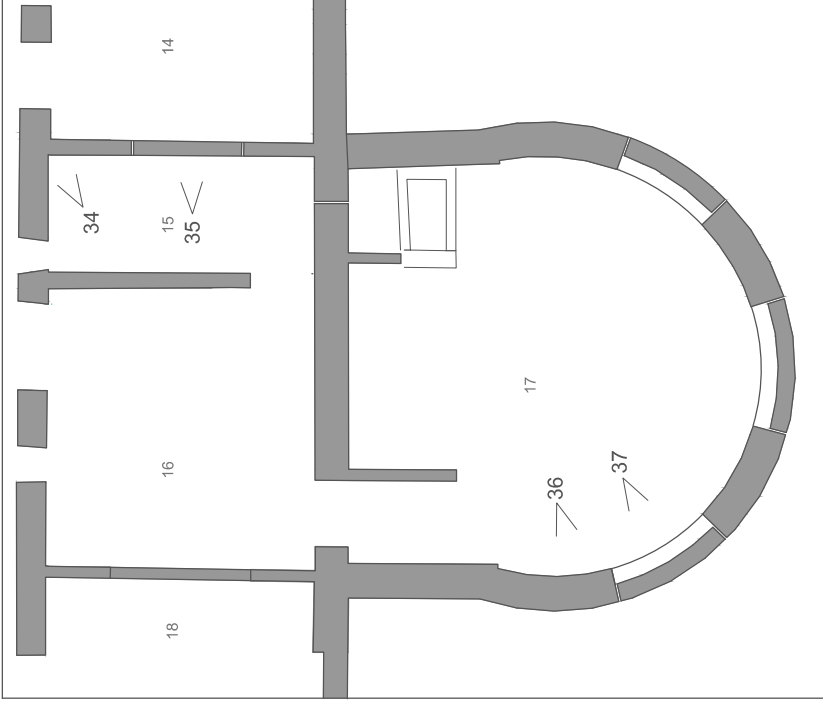
37 Tamponamento



34 Assenza di ammorsamento



36 Ricostruzione in laterizio



Villa Diomede

B.5.09

scala 1:100

QUADRO FESSURATIVO

AMBIENTI 15-17



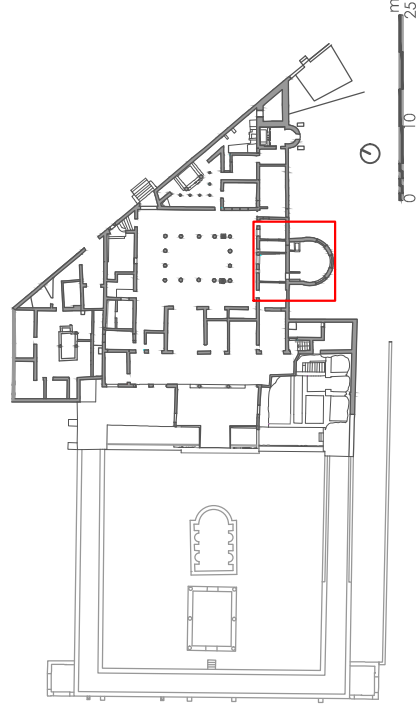
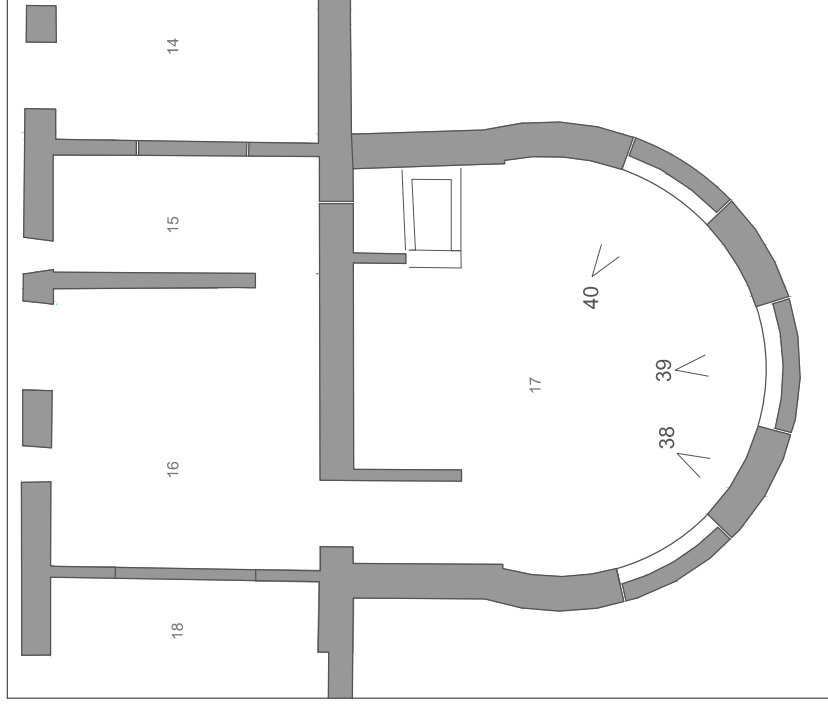
39 Tamponamento



38 Ricostruzione in laterizio



40 Tamponamento



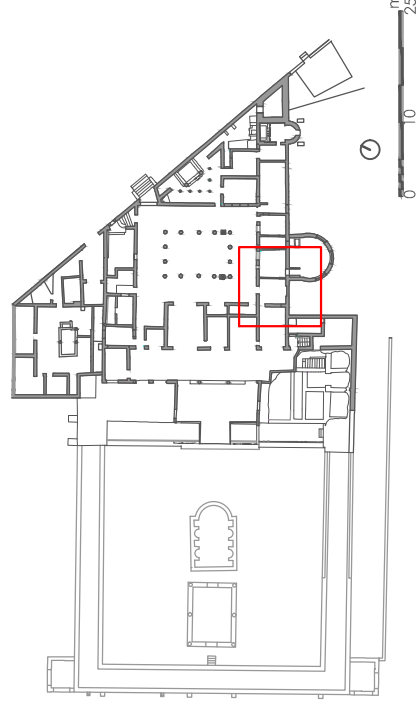
Villa Diomede

B.5.10

scala 1:100

QUADRO FESSURATIVO

AMBIENTE 17



Villa Diomede

B.5.11

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

AMBIENTE 16



46 Mancanza



44 Mancanze



45 Assenza di ammassamento



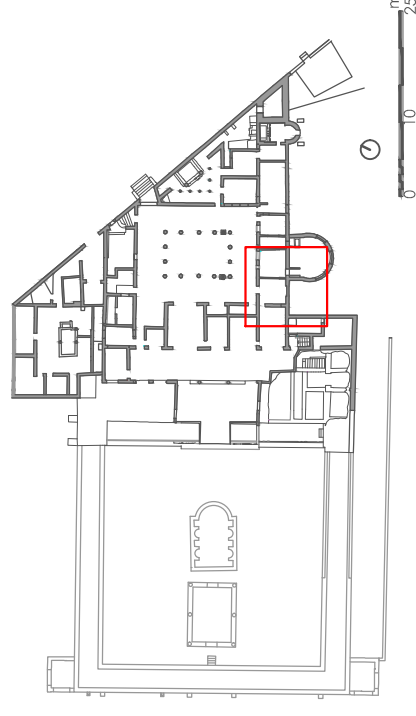
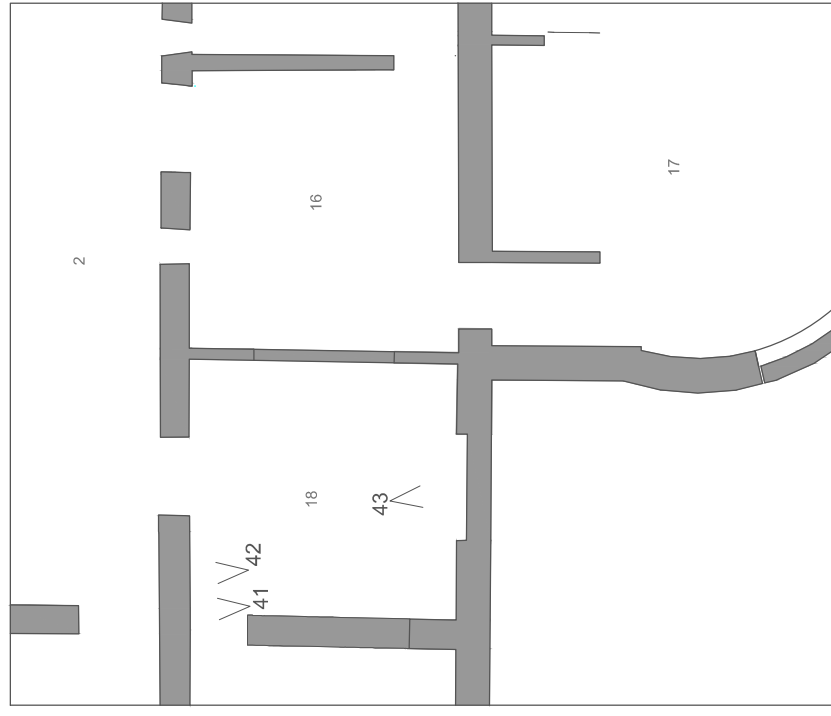
42 Mancanza



41 Cavità



43 Tamponamento



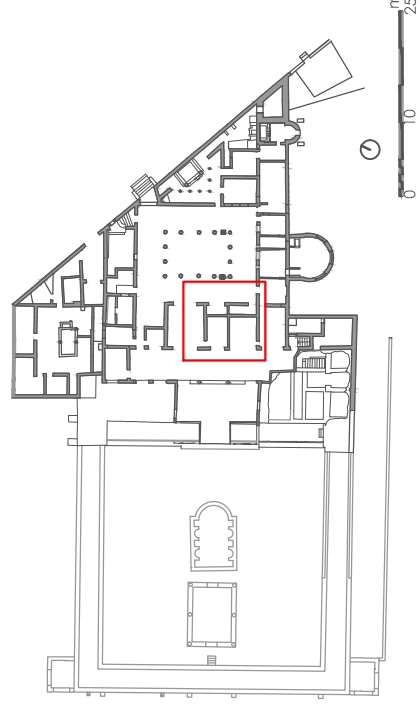
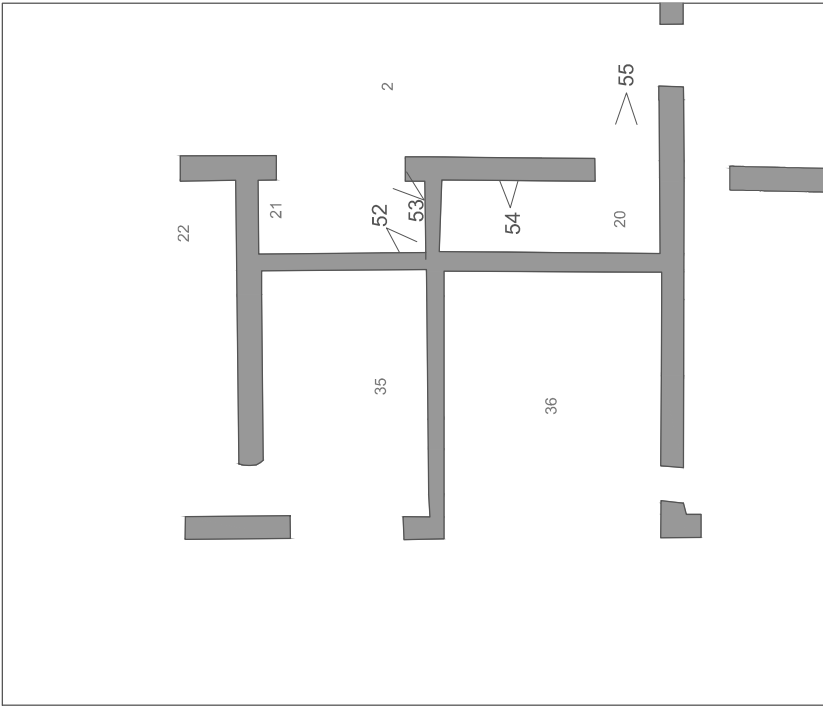
Villa Diomede

B.5.12

scala 1:100

QUADRO FESSURATIVO

AMBIENTE 18



Villa Diomede

B.5.13

QUADRO FESSURATIVO
scala 1:100

AMBIENTI 20-21



53 Assenza di ammassamento



55 Lesione passante (media)



52 Assenza di ammassamento



54 Lesione passante (media)



48 Lesione (piccola)



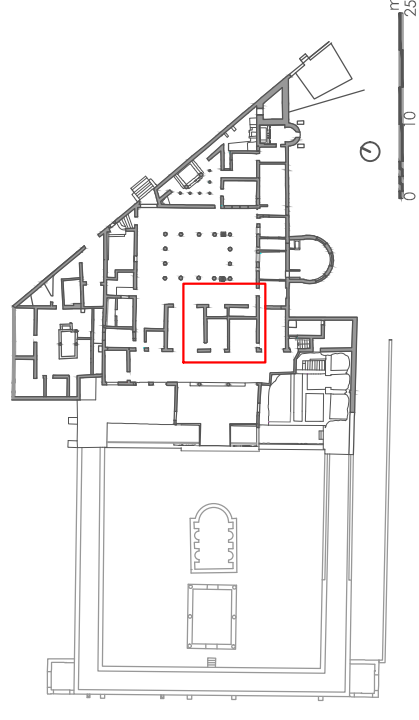
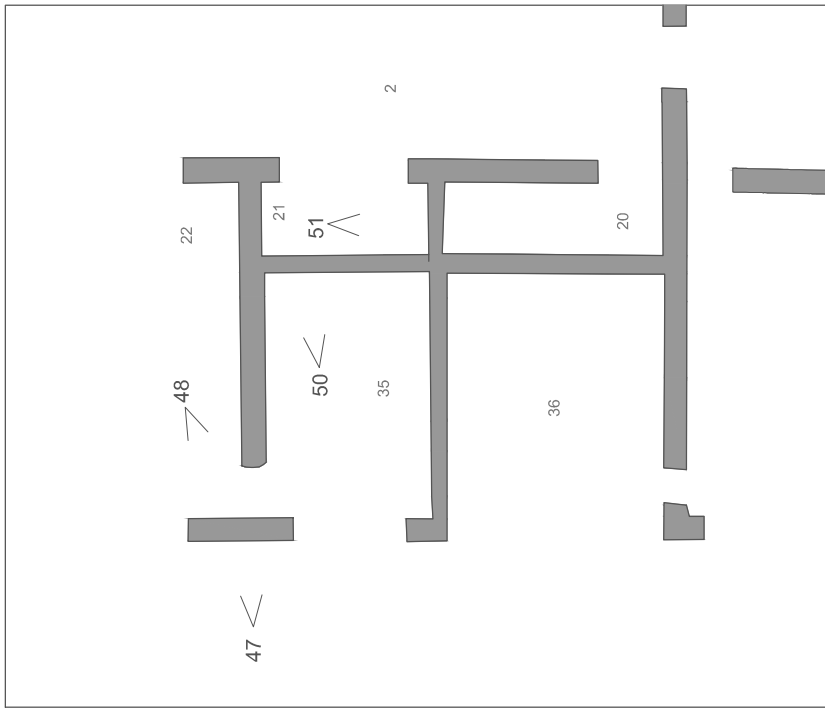
47 Lesione passante (piccola)



51 Lesioni



50 Cavità



Villa Diomede

B.5.14

scala 1:100

QUADRO FESSURATIVO

AMBIENTI 21-35



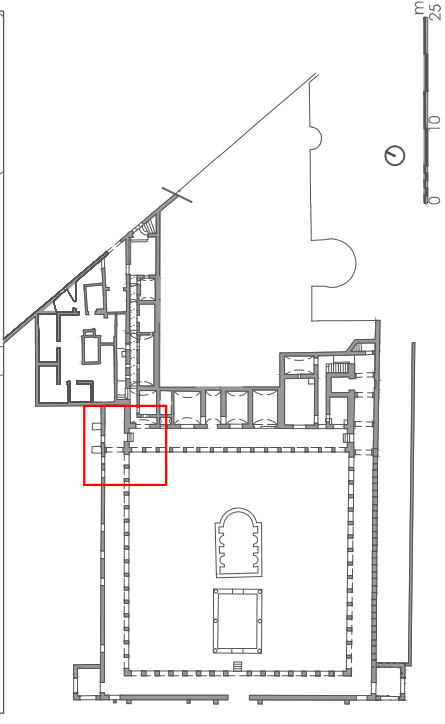
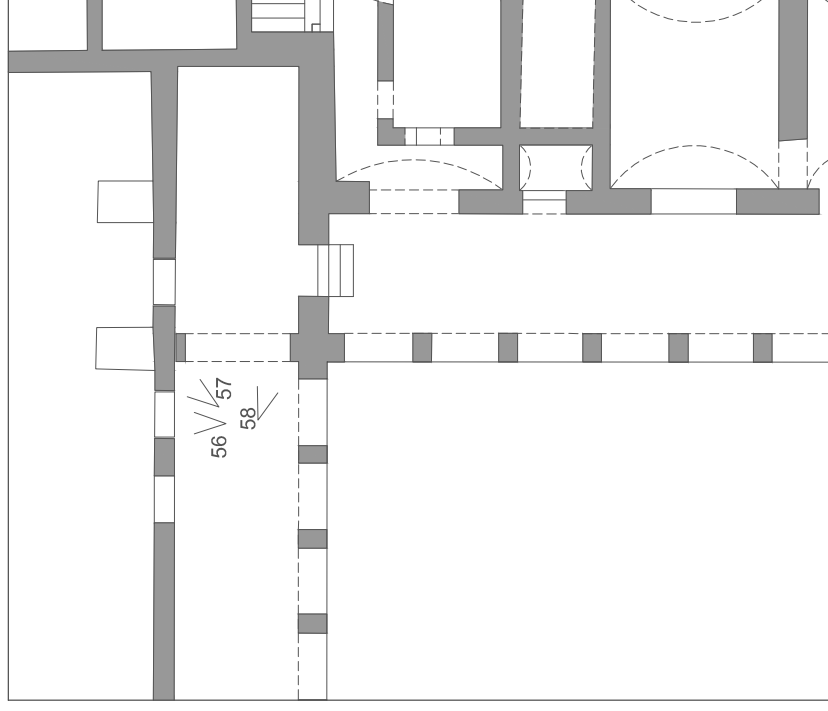
57 Assenza di ammassamento



56 Tamponamento



58 Lesione



Villa Diomede

B.5.15

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

PORTICO NORD



59 Mancanze



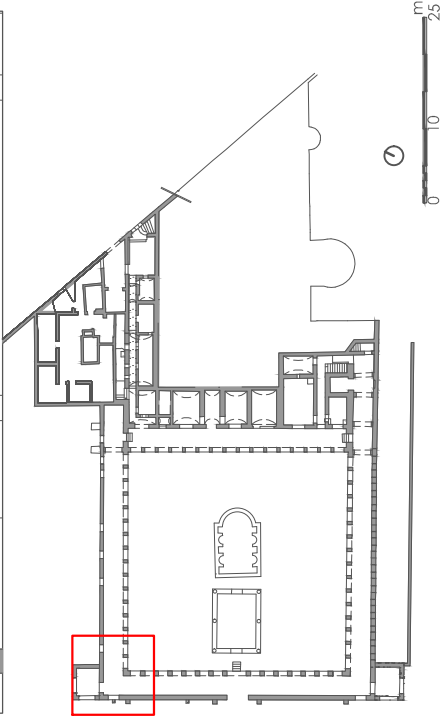
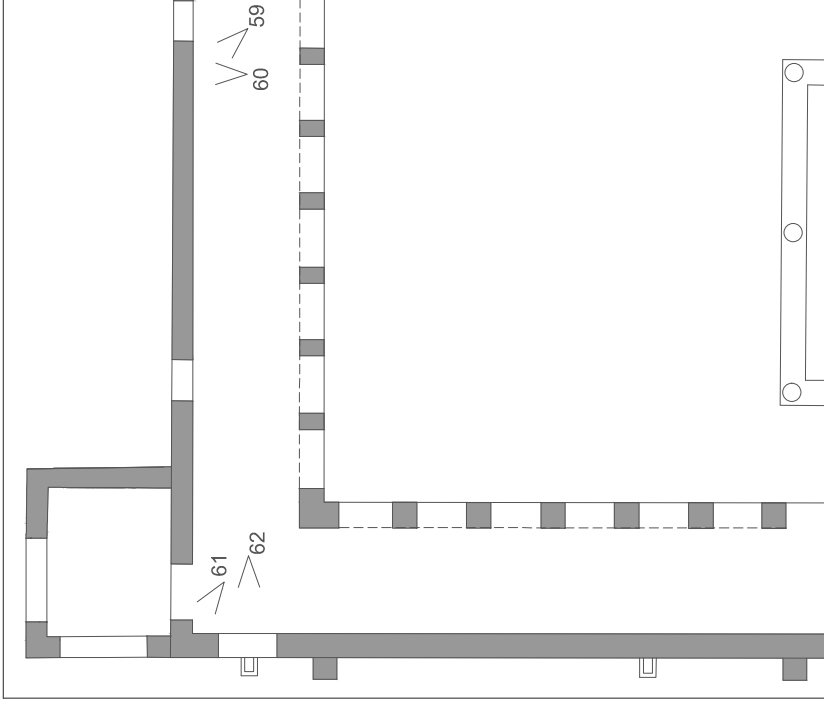
60 Mancanze



61 Mancanze



62 Tamponamento dell'arco



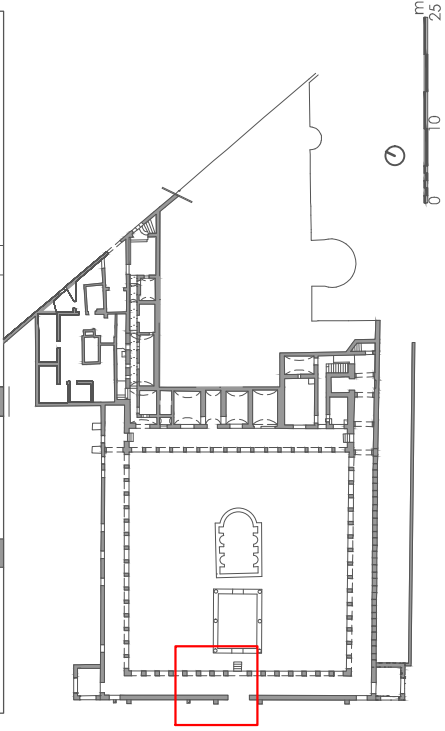
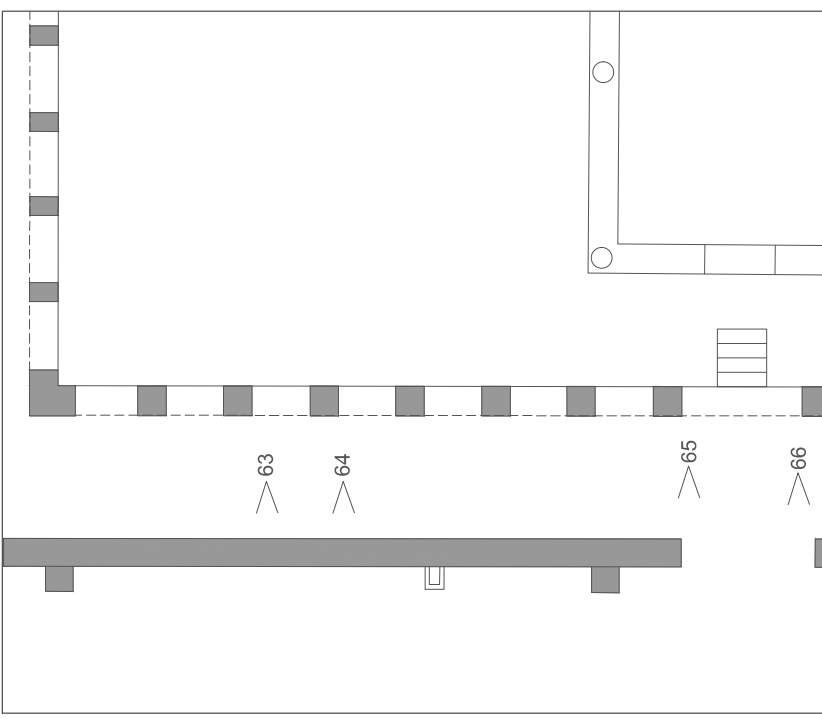
Villa Diomede

B.5.16

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

PORTICO NORD



Villa Diomede
B.5.17
 QUADRO FESSURATIVO
 PORTICO OVEST
 scala 1:100



64 Mancanze



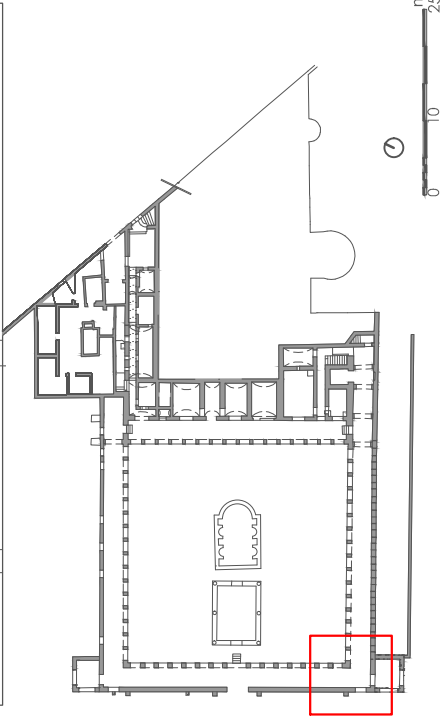
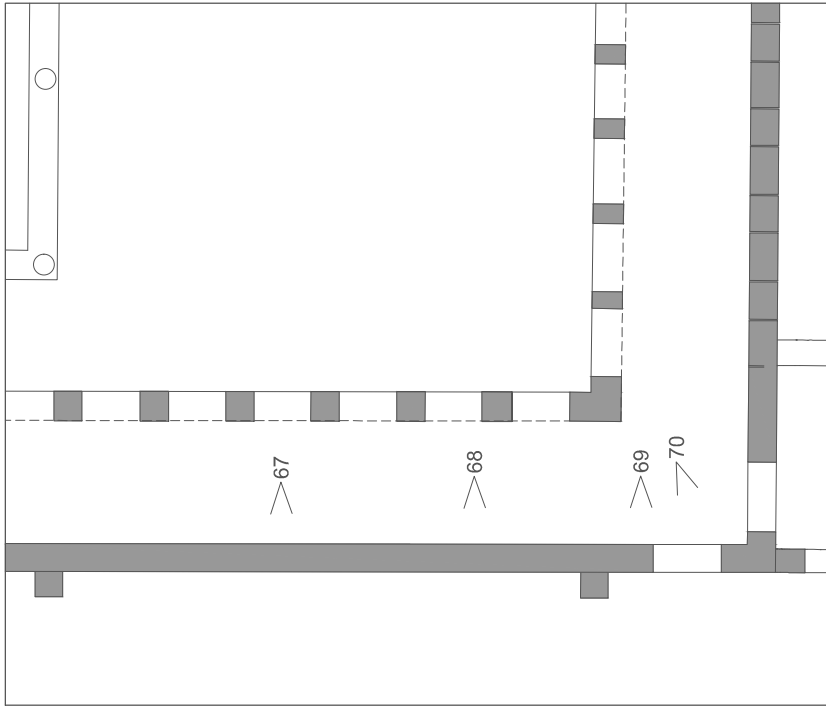
66 Rinforzo dello spigolo in laterizio



63 Mancanze



65 Rinforzo dello spigolo in laterizio



Villa Diomede

B.5.18

QUADRO FESSURATIVO

scala 1:100

PORTICO OVEST



68 Mancanze



70 Mancanze



67 Riparazione in opus reticolatum



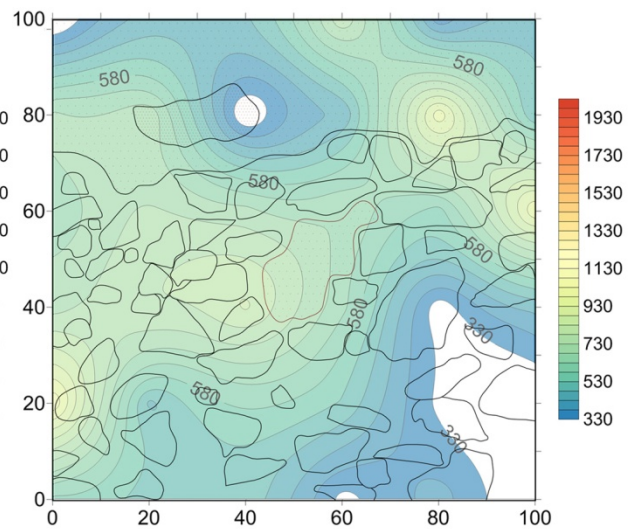
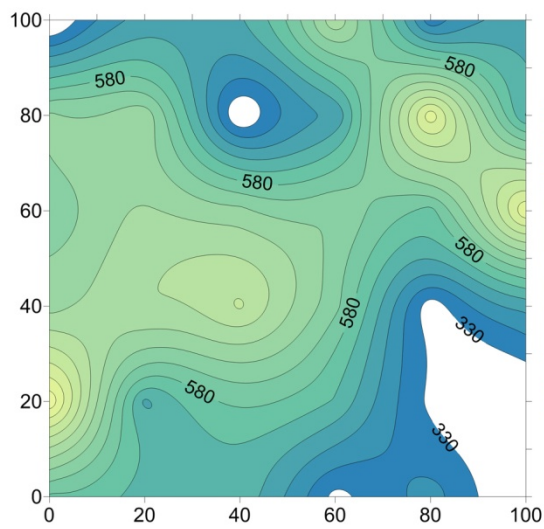
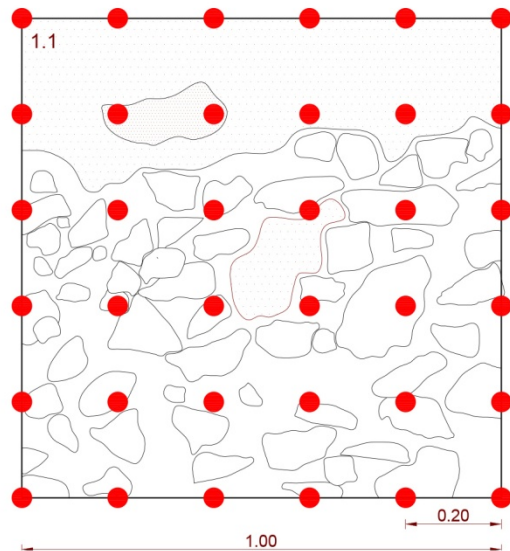
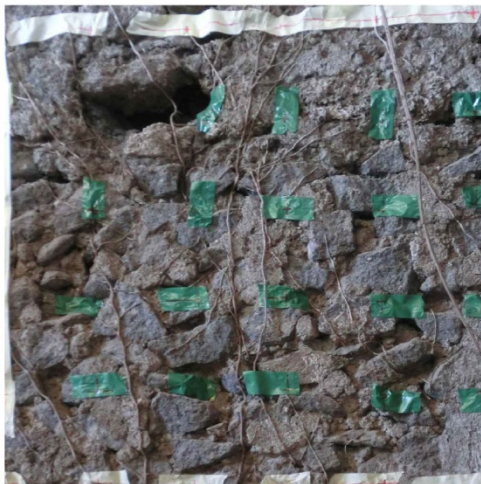
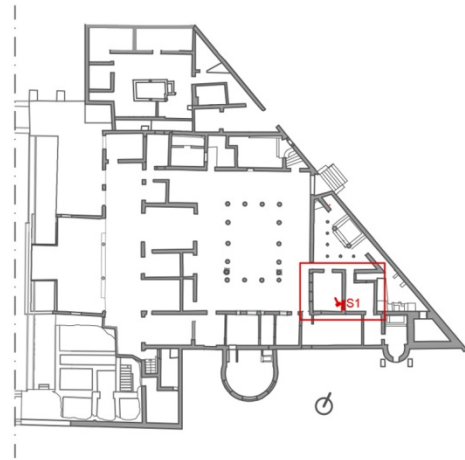
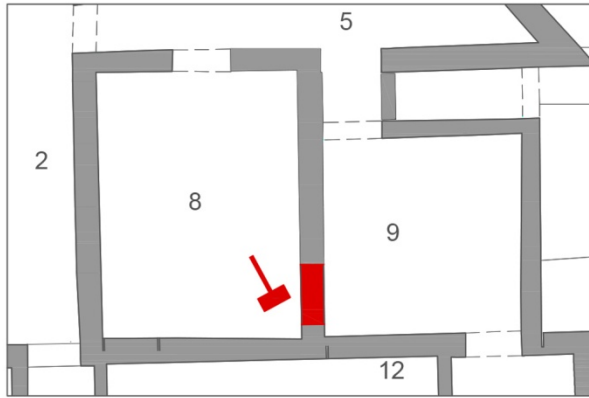
69 Mancanze

Allegato C

Schede prove soniche

PROVA SONICA DIRETTA S1

LOCALIZZAZIONE

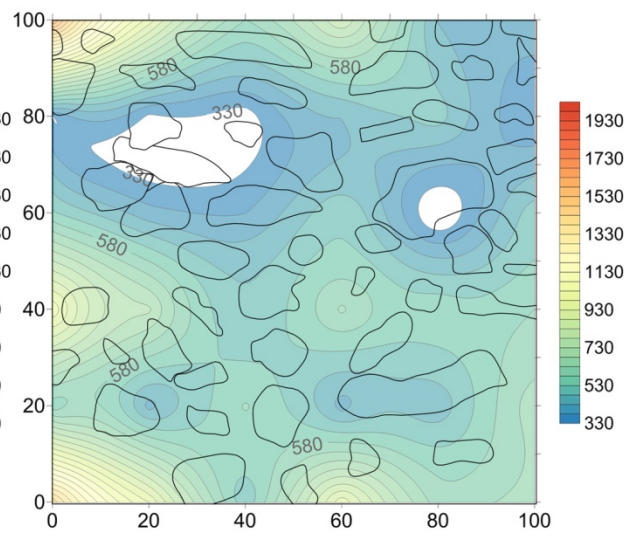
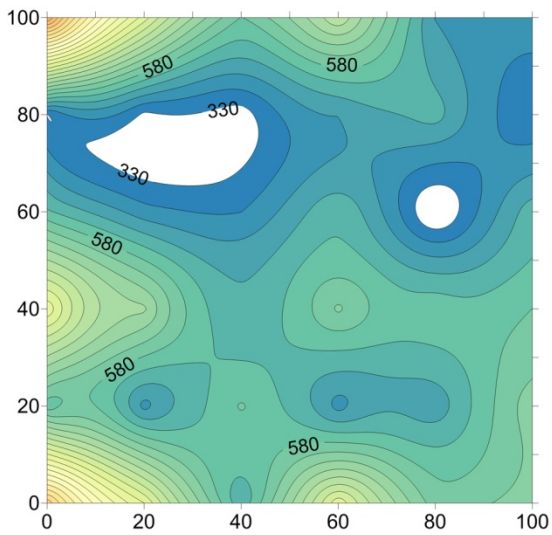
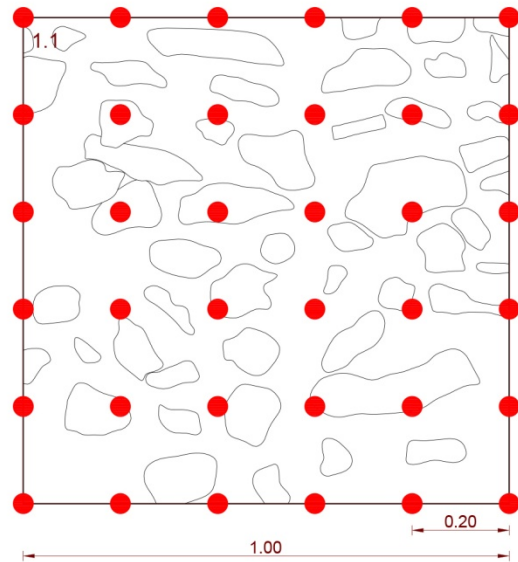
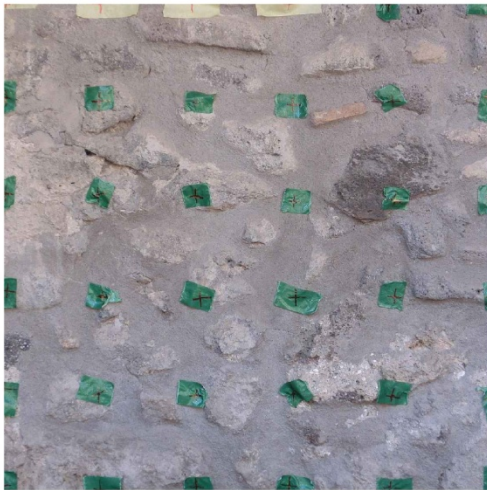
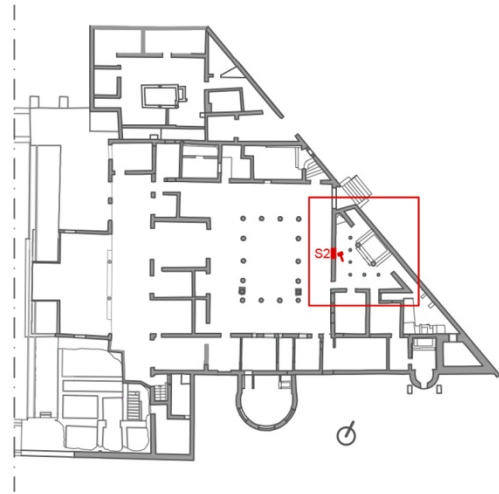
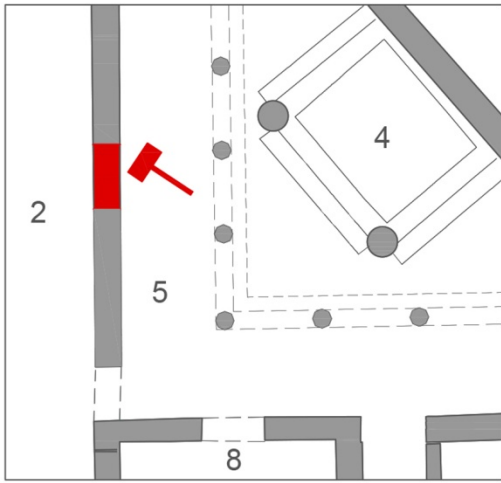


ELABORAZIONE

Prova sonica S1									
Percorso	Spessore [m]	Tempo di volo [s]			Tm [s]	Velocità [m/s]			Vm [m/s]
		T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]		V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	
1.1	0.40	1.43E-03	1.64E-03	1.73E-03	1.60E-03	2.80E+02	2.44E+02	2.31E+02	2.52E+02
1.2	0.40	8.65E-04	9.00E-04	8.90E-04	8.85E-04	4.62E+02	4.44E+02	4.49E+02	4.52E+02
1.3	0.40	7.26E-04	8.56E-04	8.36E-04	8.06E-04	5.23E+02	4.44E+02	4.55E+02	4.74E+02
1.4	0.40	4.58E-04	5.68E-04	5.39E-04	5.22E-04	8.73E+02	7.04E+02	7.42E+02	7.73E+02
1.5	0.40	1.07E-03	1.29E-03	1.15E-03	1.17E-03	3.74E+02	3.09E+02	3.48E+02	3.44E+02
1.6	0.40	9.81E-04	7.60E-04	9.17E-04	8.86E-04	4.08E+02	5.27E+02	4.36E+02	4.57E+02
2.1	0.40	5.93E-04	5.07E-04	6.62E-04	5.87E-04	6.75E+02	7.89E+02	6.04E+02	6.89E+02
2.2	0.40	5.93E-04	5.15E-04	5.78E-04	5.62E-04	6.75E+02	7.77E+02	6.92E+02	7.14E+02
2.3	0.40	1.61E-03	1.50E-03	1.36E-03	1.49E-03	2.48E+02	2.67E+02	2.94E+02	2.70E+02
2.4	0.40	8.30E-04	9.93E-04	9.61E-04	9.28E-04	4.82E+02	4.03E+02	4.16E+02	4.34E+02
2.5	0.40	3.99E-04	4.16E-04	4.31E-04	4.16E-04	1.00E+03	9.60E+02	9.28E+02	9.63E+02
2.6	0.40	8.15E-04	8.39E-04	8.59E-04	8.38E-04	4.91E+02	4.77E+02	4.66E+02	4.78E+02
3.1	0.40	6.44E-04	6.07E-04	6.45E-04	6.32E-04	6.21E+02	6.59E+02	6.21E+02	6.34E+02
3.2	0.40	5.41E-04	5.66E-04	5.27E-04	5.45E-04	7.39E+02	7.06E+02	7.59E+02	7.35E+02
3.3	0.40	5.63E-04	6.43E-04	5.31E-04	5.79E-04	7.11E+02	6.22E+02	7.53E+02	6.95E+02
3.4	0.40	5.93E-04	6.08E-04	5.80E-04	5.94E-04	6.74E+02	6.58E+02	6.90E+02	6.74E+02
3.5	0.40	6.84E-04	7.69E-04	6.87E-04	7.13E-04	5.85E+02	5.20E+02	5.83E+02	5.63E+02
3.6	0.40	4.55E-04	3.81E-04	4.01E-04	4.12E-04	8.79E+02	1.05E+03	9.98E+02	9.75E+02
4.1	0.40	5.80E-04	5.30E-04	5.84E-04	5.65E-04	6.89E+02	7.55E+02	6.84E+02	7.10E+02
4.2	0.40	5.14E-04	5.52E-04	4.85E-04	5.17E-04	7.78E+02	7.25E+02	8.25E+02	7.76E+02
4.3	0.40	4.58E-04	4.99E-04	4.79E-04	4.78E-04	8.74E+02	8.02E+02	8.36E+02	8.37E+02
4.4	0.40	6.14E-04	5.60E-04	7.01E-04	6.25E-04	6.51E+02	7.14E+02	5.71E+02	6.46E+02
4.5	0.40	1.36E-03	1.24E-03	1.41E-03	1.34E-03	2.95E+02	3.23E+02	2.84E+02	3.01E+02
4.6	0.40	9.09E-04	8.22E-04	9.55E-04	8.95E-04	4.40E+02	4.87E+02	4.19E+02	4.49E+02
5.1	0.40	4.01E-04	4.26E-04	3.53E-04	3.93E-04	9.97E+02	9.40E+02	1.13E+03	1.02E+03
5.2	0.40	9.33E-04	7.65E-04	8.78E-04	8.59E-04	4.29E+02	5.23E+02	4.56E+02	4.69E+02
5.3	0.40	6.60E-04	7.25E-04	6.50E-04	6.78E-04	6.06E+02	5.51E+02	6.15E+02	5.91E+02
5.4	0.40	7.88E-04	7.72E-04	7.33E-04	7.64E-04	5.08E+02	5.18E+02	5.46E+02	5.24E+02
5.5	0.40	1.25E-03	1.24E-03	1.27E-03	1.25E-03	3.21E+02	3.22E+02	3.14E+02	3.19E+02
5.6	0.40	1.48E-03	1.59E-03	1.34E-03	1.47E-03	2.71E+02	2.52E+02	2.99E+02	2.74E+02
6.1	0.40	6.50E-04	7.18E-04	7.48E-04	7.05E-04	6.16E+02	5.57E+02	5.35E+02	5.69E+02
6.2	0.40	7.41E-04	8.53E-04	7.71E-04	7.88E-04	5.40E+02	4.69E+02	5.19E+02	5.09E+02
6.3	0.40	8.72E-04	7.44E-04	7.31E-04	7.83E-04	4.58E+02	5.38E+02	5.47E+02	5.14E+02
6.4	0.40	1.14E-03	1.32E-03	1.40E-03	1.29E-03	3.50E+02	3.03E+02	2.86E+02	3.13E+02
6.5	0.40	1.12E-03	9.22E-04	9.52E-04	9.98E-04	3.58E+02	4.34E+02	4.20E+02	4.04E+02
6.6	0.40	1.53E-03	1.31E-03	1.50E-03	1.44E-03	2.62E+02	3.06E+02	2.67E+02	2.78E+02

PROVA SONICA DIRETTA S2

LOCALIZZAZIONE

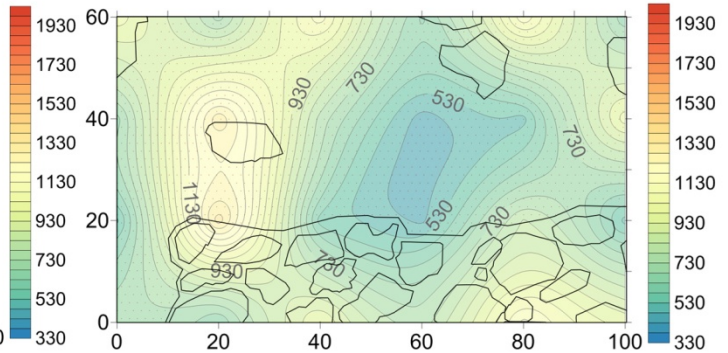
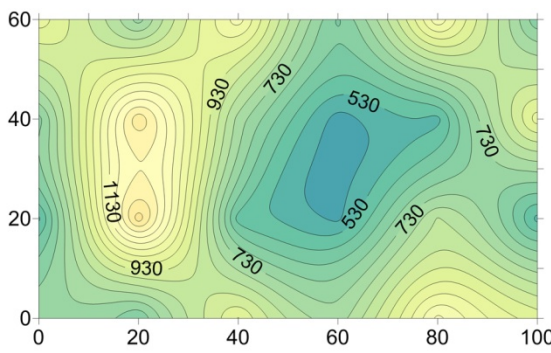
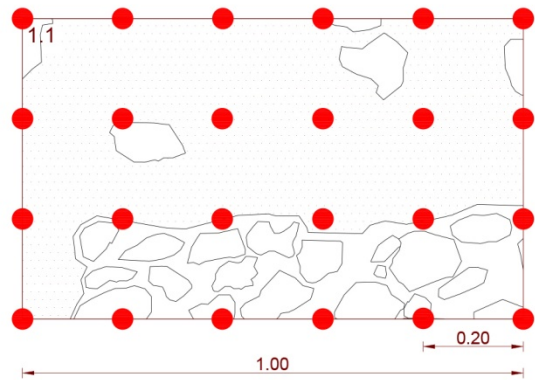
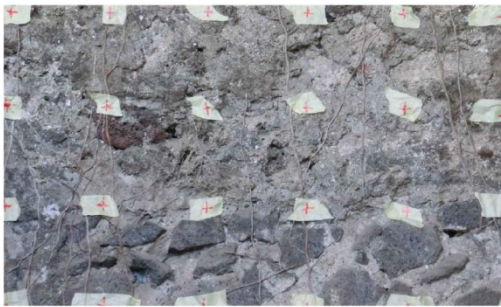
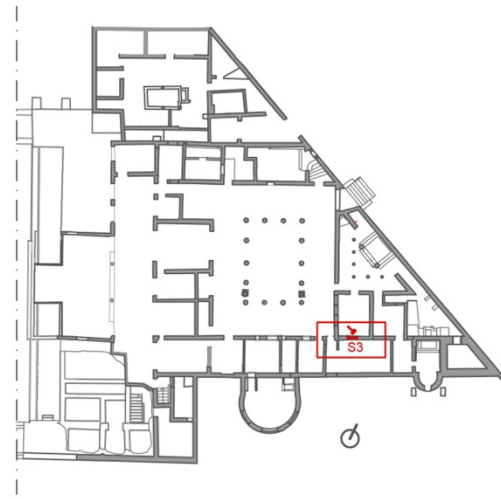
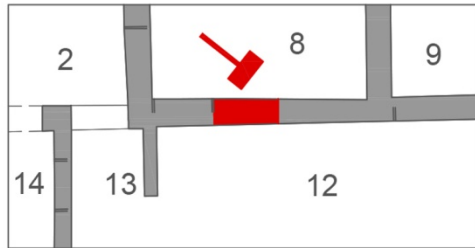


ELABORAZIONE

Prova sonica S2									
Percorso	Spessore	Tempo di volo [s]			Tm [s]	Velocità [m/s]			Vm [m/s]
	[m]	T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]		V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	
1.1	0.40	2.53E-04	2.47E-04	2.36E-04	2.45E-04	1.58E+03	1.62E+03	1.69E+03	1.63E+03
1.2	0.40	4.36E-04	3.72E-04	4.58E-04	4.22E-04	9.18E+02	1.08E+03	8.74E+02	9.56E+02
1.3	0.40	6.50E-04	7.57E-04	6.80E-04	6.96E-04	6.15E+02	5.28E+02	5.88E+02	5.77E+02
1.4	0.40	5.65E-04	4.28E-04	4.79E-04	4.91E-04	7.07E+02	9.35E+02	8.36E+02	8.26E+02
1.5	0.40	8.73E-04	9.98E-04	9.48E-04	9.40E-04	4.58E+02	4.01E+02	4.22E+02	4.27E+02
1.6	0.40	1.08E-03	9.93E-04	8.92E-04	9.87E-04	3.71E+02	4.03E+02	4.49E+02	4.08E+02
2.1	0.40	1.27E-03	1.19E-03	1.20E-03	1.22E-03	3.15E+02	3.35E+02	3.35E+02	3.28E+02
2.2	0.40	1.30E-03	1.20E-03	1.28E-03	1.26E-03	3.09E+02	3.33E+02	3.14E+02	3.18E+02
2.3	0.40	1.47E-03	1.21E-03	1.28E-03	1.32E-03	2.73E+02	3.30E+02	3.12E+02	3.05E+02
2.4	0.40	9.62E-04	9.00E-04	9.20E-04	9.27E-04	4.16E+02	4.44E+02	4.35E+02	4.32E+02
2.5	0.40	8.18E-04	8.43E-04	7.32E-04	7.98E-04	4.89E+02	4.75E+02	5.46E+02	5.03E+02
2.6	0.40	1.21E-03	1.15E-03	1.25E-03	1.20E-03	3.32E+02	3.49E+02	3.20E+02	3.34E+02
3.1	0.40	7.88E-04	7.44E-04	7.00E-04	7.44E-04	5.08E+02	5.38E+02	5.71E+02	5.39E+02
3.2	0.40	9.38E-04	1.11E-03	9.56E-04	1.00E-03	4.27E+02	3.60E+02	4.18E+02	4.02E+02
3.3	0.40	1.12E-03	1.12E-03	9.42E-04	1.06E-03	3.57E+02	3.56E+02	4.25E+02	3.80E+02
3.4	0.40	7.19E-04	7.66E-04	8.04E-04	7.63E-04	5.56E+02	5.22E+02	4.97E+02	5.25E+02
3.5	0.40	1.67E-03	1.41E-03	1.56E-03	1.55E-03	2.39E+02	2.84E+02	2.57E+02	2.60E+02
3.6	0.40	8.76E-04	7.70E-04	7.18E-04	7.88E-04	4.57E+02	5.19E+02	5.57E+02	5.11E+02
4.1	0.40	3.69E-04	3.89E-04	4.23E-04	3.94E-04	1.08E+03	1.03E+03	9.45E+02	1.02E+03
4.2	0.40	5.56E-04	5.17E-04	5.53E-04	5.42E-04	7.19E+02	7.73E+02	7.24E+02	7.39E+02
4.3	0.40	7.75E-04	8.91E-04	8.27E-04	8.31E-04	5.16E+02	4.49E+02	4.84E+02	4.83E+02
4.4	0.40	6.52E-04	5.88E-04	6.42E-04	6.27E-04	6.13E+02	6.80E+02	6.23E+02	6.39E+02
4.5	0.40	7.74E-04	6.60E-04	7.03E-04	7.12E-04	5.17E+02	6.06E+02	5.69E+02	5.64E+02
4.6	0.40	6.81E-04	6.85E-04	7.01E-04	6.89E-04	5.87E+02	5.84E+02	5.71E+02	5.80E+02
5.1	0.40	8.08E-04	6.80E-04	7.00E-04	7.29E-04	4.95E+02	5.88E+02	5.71E+02	5.52E+02
5.2	0.40	9.25E-04	1.08E-03	9.17E-04	9.75E-04	4.32E+02	3.69E+02	4.36E+02	4.13E+02
5.3	0.40	6.39E-04	7.98E-04	6.34E-04	6.90E-04	6.26E+02	5.01E+02	6.30E+02	5.86E+02
5.4	0.40	9.43E-04	9.85E-04	9.99E-04	9.76E-04	4.24E+02	4.06E+02	4.00E+02	4.10E+02
5.5	0.40	9.05E-04	9.73E-04	8.19E-04	8.99E-04	4.42E+02	4.11E+02	4.88E+02	4.47E+02
5.6	0.40	6.99E-04	6.02E-04	5.34E-04	6.12E-04	5.72E+02	6.64E+02	7.49E+02	6.62E+02
6.1	0.40	2.54E-04	2.85E-04	2.82E-04	2.74E-04	1.58E+03	1.40E+03	1.42E+03	1.47E+03
6.2	0.40	4.29E-04	3.54E-04	4.55E-04	4.13E-04	9.32E+02	1.13E+03	8.79E+02	9.81E+02
6.3	0.40	8.67E-04	7.87E-04	7.95E-04	8.16E-04	4.61E+02	5.09E+02	5.03E+02	4.91E+02
6.4	0.40	4.30E-04	4.11E-04	4.00E-04	4.14E-04	9.31E+02	9.74E+02	1.00E+03	9.68E+02
6.5	0.40	7.05E-04	7.17E-04	5.81E-04	6.68E-04	5.67E+02	5.58E+02	6.88E+02	6.04E+02
6.6	0.40	6.05E-04	5.71E-04	6.68E-04	6.15E-04	6.61E+02	7.01E+02	5.99E+02	6.53E+02

PROVA SONICA DIRETTA S3

LOCALIZZAZIONE

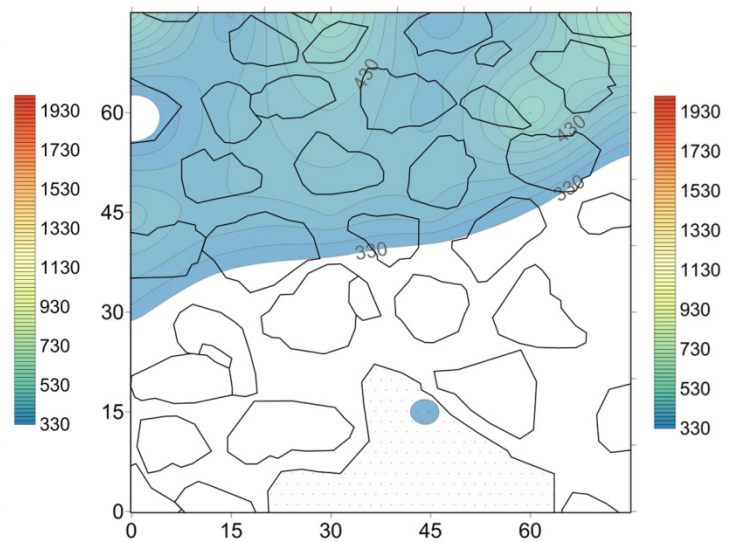
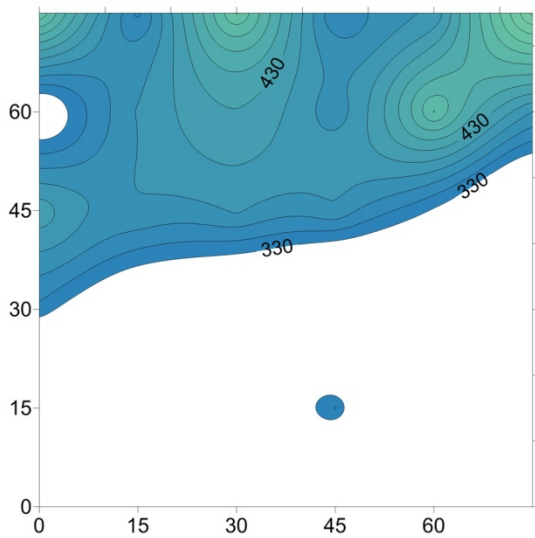
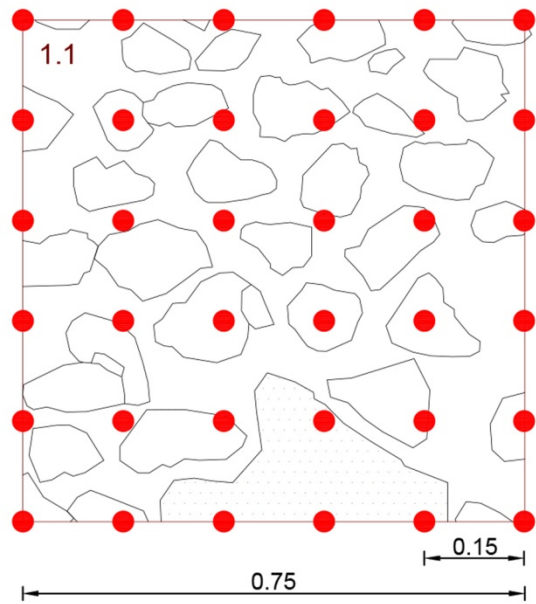
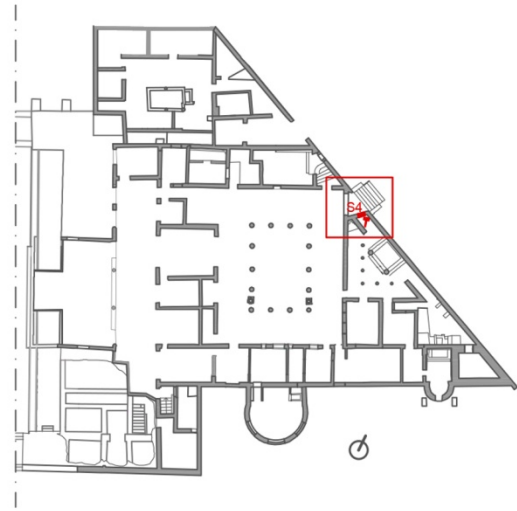
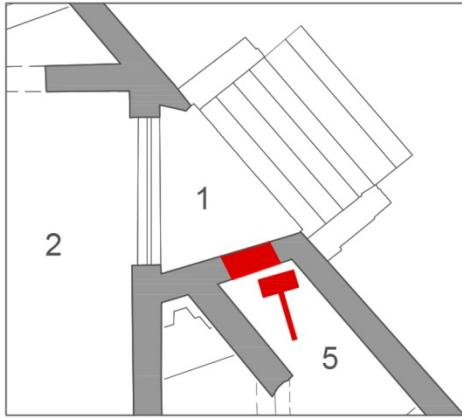


ELABORAZIONE

Prova sonica S3									
Percorso	Spessore	Tempo di volo [s]			Tm [s]	Velocità [m/s]			Vm [m/s]
	[m]	T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]		V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	
1.1	0.40	4.03E-04	4.12E-04	3.75E-04	3.97E-04	9.93E+02	9.71E+02	1.07E+03	1.01E+03
1.2	0.40	6.30E-04	5.03E-04	5.81E-04	5.71E-04	6.35E+02	7.95E+02	6.88E+02	7.06E+02
1.3	0.40	3.61E-04	3.63E-04	3.60E-04	3.61E-04	1.11E+03	1.10E+03	1.11E+03	1.11E+03
1.4	0.40	5.99E-04	6.44E-04	6.86E-04	6.43E-04	6.67E+02	6.21E+02	5.83E+02	6.24E+02
1.5	0.40	3.37E-04	3.59E-04	3.76E-04	3.57E-04	1.19E+03	1.11E+03	1.06E+03	1.12E+03
1.6	0.40	6.38E-04	5.86E-04	6.58E-04	6.27E-04	6.27E+02	6.82E+02	6.08E+02	6.39E+02
2.1	0.40	6.01E-04	5.33E-04	6.99E-04	6.11E-04	6.65E+02	7.50E+02	5.72E+02	6.63E+02
2.2	0.40	3.31E-04	2.64E-04	3.26E-04	3.07E-04	1.21E+03	1.52E+03	1.23E+03	1.32E+03
2.3	0.40	5.18E-04	5.39E-04	5.20E-04	5.26E-04	7.72E+02	7.43E+02	7.69E+02	7.61E+02
2.4	0.40	7.98E-04	8.70E-04	9.53E-04	8.74E-04	5.01E+02	4.60E+02	4.20E+02	4.60E+02
2.5	0.40	7.22E-04	7.51E-04	8.66E-04	7.80E-04	5.54E+02	5.33E+02	4.62E+02	5.16E+02
2.6	0.40	4.36E-04	3.78E-04	3.82E-04	3.99E-04	9.16E+02	1.06E+03	1.05E+03	1.01E+03
3.1	0.40	7.80E-04	7.63E-04	7.62E-04	7.68E-04	5.13E+02	5.24E+02	5.25E+02	5.21E+02
3.2	0.40	2.63E-04	3.03E-04	3.26E-04	2.97E-04	1.52E+03	1.32E+03	1.23E+03	1.36E+03
3.3	0.40	7.07E-04	6.79E-04	7.68E-04	7.18E-04	5.66E+02	5.89E+02	5.21E+02	5.58E+02
3.4	0.40	8.99E-04	7.96E-04	8.65E-04	8.53E-04	4.45E+02	5.02E+02	4.63E+02	4.70E+02
3.5	0.40	5.49E-04	4.74E-04	4.30E-04	4.84E-04	7.29E+02	8.45E+02	9.29E+02	8.34E+02
3.6	0.40	7.16E-04	8.44E-04	7.89E-04	7.83E-04	5.59E+02	4.74E+02	5.07E+02	5.13E+02
4.1	0.40	5.93E-04	4.85E-04	5.83E-04	5.54E-04	6.75E+02	8.25E+02	6.86E+02	7.29E+02
4.2	0.40	6.99E-04	5.67E-04	6.52E-04	6.39E-04	5.72E+02	7.05E+02	6.14E+02	6.30E+02
4.3	0.40	4.24E-04	4.28E-04	3.73E-04	4.09E-04	9.43E+02	9.34E+02	1.07E+03	9.83E+02
4.4	0.40	5.32E-04	5.32E-04	5.33E-04	5.33E-04	7.51E+02	7.51E+02	7.51E+02	7.51E+02
4.5	0.40	3.46E-04	3.46E-04	3.57E-04	3.50E-04	1.15E+03	1.15E+03	1.12E+03	1.14E+03
4.6	0.40	4.07E-04	3.89E-04	4.60E-04	4.19E-04	9.82E+02	1.03E+03	8.70E+02	9.60E+02

PROVA SONICA DIRETTA S4

LOCALIZZAZIONE

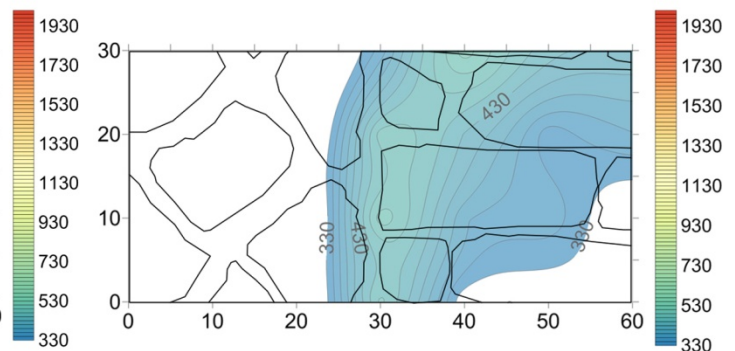
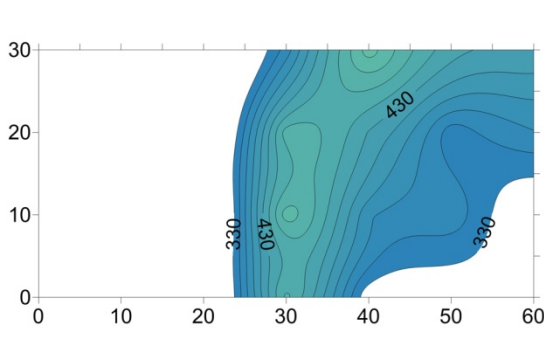
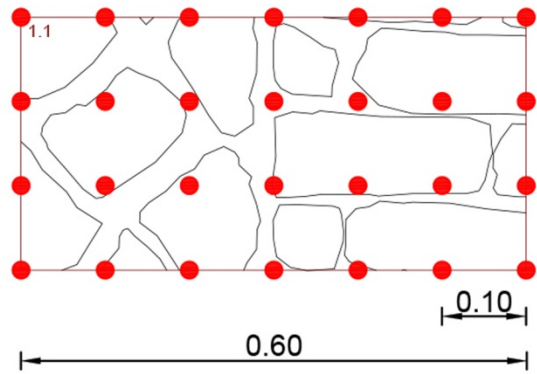
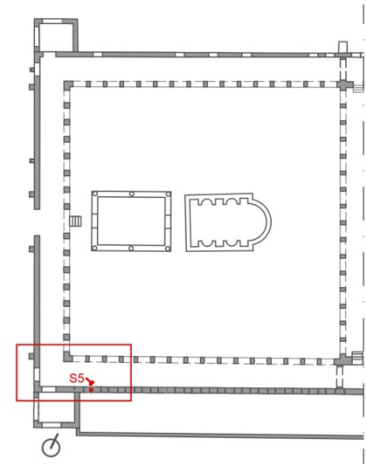
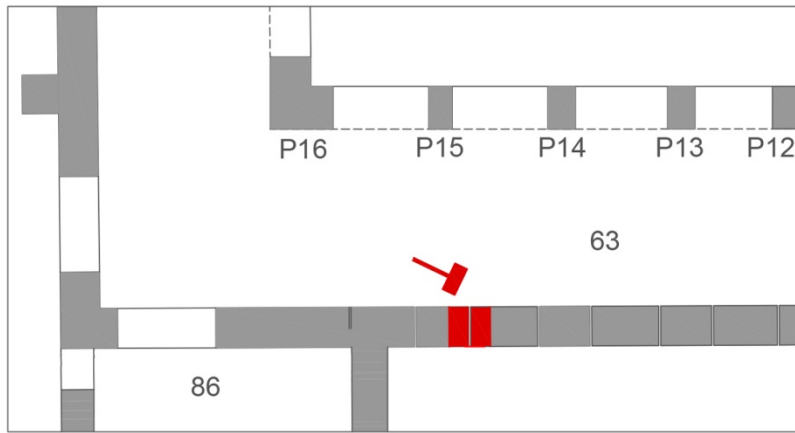


ELABORAZIONE

Prova sonica S4									
Percorso	Spessore [m]	Tempo di volo [s]			Tm [s]	Velocità [m/s]			Vm [m/s]
		T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]		V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	
1.1	0.40	8.34E-04	7.54E-04	8.02E-04	7.97E-04	5.04E+02	5.57E+02	5.23E+02	5.28E+02
1.2	0.40	1.24E-03	1.26E-03	1.16E-03	1.22E-03	3.40E+02	3.34E+02	3.61E+02	3.45E+02
1.3	0.40	7.98E-04	7.93E-04	7.76E-04	7.89E-04	5.26E+02	5.29E+02	5.42E+02	5.32E+02
1.4	0.40	1.06E-03	1.21E-03	1.35E-03	1.21E-03	3.96E+02	3.46E+02	3.11E+02	3.51E+02
1.5	0.40	1.08E-03	1.20E-03	9.61E-04	1.08E-03	3.87E+02	3.51E+02	4.37E+02	3.92E+02
1.6	0.40	6.13E-04	7.38E-04	7.91E-04	7.14E-04	6.85E+02	5.69E+02	5.31E+02	5.95E+02
2.1	0.40	1.35E-03	1.60E-03	1.43E-03	1.46E-03	3.12E+02	2.62E+02	2.94E+02	2.89E+02
2.2	0.40	1.08E-03	1.07E-03	1.07E-03	1.07E-03	3.90E+02	3.92E+02	3.94E+02	3.92E+02
2.3	0.40	9.05E-04	9.67E-04	1.08E-03	9.85E-04	4.64E+02	4.34E+02	3.88E+02	4.29E+02
2.4	0.40	1.10E-03	1.02E-03	1.22E-03	1.11E-03	3.81E+02	4.11E+02	3.45E+02	3.79E+02
2.5	0.40	8.11E-04	8.76E-04	7.82E-04	8.23E-04	5.18E+02	4.80E+02	5.37E+02	5.11E+02
2.6	0.40	9.91E-04	1.16E-03	1.10E-03	1.08E-03	4.24E+02	3.64E+02	3.81E+02	3.89E+02
3.1	0.40	9.37E-04	1.02E-03	1.03E-03	9.93E-04	4.48E+02	4.13E+02	4.10E+02	4.24E+02
3.2	0.40	1.10E-03	9.60E-04	1.23E-03	1.10E-03	3.81E+02	4.37E+02	3.41E+02	3.86E+02
3.3	0.40	9.96E-04	1.24E-03	1.00E-03	1.08E-03	4.22E+02	3.40E+02	4.20E+02	3.94E+02
3.4	0.40	1.20E-03	9.97E-04	1.09E-03	1.09E-03	3.51E+02	4.21E+02	3.87E+02	3.86E+02
3.5	0.40	1.22E-03	1.29E-03	1.36E-03	1.29E-03	3.45E+02	3.26E+02	3.10E+02	3.27E+02
3.6	0.40	1.85E-03	2.02E-03	1.85E-03	1.90E-03	2.28E+02	2.08E+02	2.27E+02	2.21E+02
4.1	0.40	1.30E-03	1.06E-03	1.35E-03	1.24E-03	3.24E+02	3.96E+02	3.12E+02	3.44E+02
4.2	0.40	1.57E-03	1.70E-03	1.40E-03	1.56E-03	2.68E+02	2.47E+02	3.01E+02	2.72E+02
4.3	0.40	1.50E-03	1.71E-03	1.68E-03	1.63E-03	2.80E+02	2.45E+02	2.50E+02	2.58E+02
4.4	0.40	2.14E-03	1.88E-03	2.04E-03	2.02E-03	1.96E+02	2.23E+02	2.06E+02	2.08E+02
4.5	0.40	1.58E-03	1.92E-03	1.76E-03	1.75E-03	2.66E+02	2.19E+02	2.39E+02	2.42E+02
4.6	0.40	1.96E-03	1.96E-03	1.54E-03	1.82E-03	2.14E+02	2.14E+02	2.72E+02	2.33E+02
5.1	0.40	2.45E-03	2.04E-03	2.18E-03	2.22E-03	1.72E+02	2.06E+02	1.93E+02	1.90E+02
5.2	0.40	2.13E-03	2.16E-03	2.19E-03	2.16E-03	1.97E+02	1.95E+02	1.91E+02	1.94E+02
5.3	0.40	1.49E-03	1.33E-03	1.34E-03	1.39E-03	2.83E+02	3.16E+02	3.13E+02	3.04E+02
5.4	0.40	1.20E-03	1.13E-03	1.26E-03	1.20E-03	3.50E+02	3.71E+02	3.33E+02	3.51E+02
5.5	0.40	2.08E-03	2.49E-03	2.56E-03	2.38E-03	2.02E+02	1.68E+02	1.64E+02	1.78E+02
5.6	0.40	1.89E-03	1.61E-03	1.48E-03	1.66E-03	2.23E+02	2.61E+02	2.84E+02	2.56E+02
6.1	0.40	1.47E-03	1.53E-03	1.50E-03	1.50E-03	2.86E+02	2.75E+02	2.81E+02	2.80E+02
6.2	0.40	1.35E-03	1.55E-03	1.63E-03	1.51E-03	3.12E+02	2.71E+02	2.58E+02	2.81E+02
6.3	0.40	1.89E-03	1.73E-03	1.86E-03	1.83E-03	2.23E+02	2.43E+02	2.26E+02	2.30E+02
6.4	0.40	2.59E-03	2.24E-03	2.02E-03	2.28E-03	1.62E+02	1.88E+02	2.08E+02	1.86E+02
6.5	0.40	2.30E-03	2.13E-03	1.74E-03	2.06E-03	1.82E+02	1.97E+02	2.42E+02	2.07E+02
6.6	0.40	1.28E-03	1.30E-03	1.39E-03	1.33E-03	3.28E+02	3.23E+02	3.01E+02	3.17E+02

PROVA SONICA DIRETTA S5

LOCALIZZAZIONE

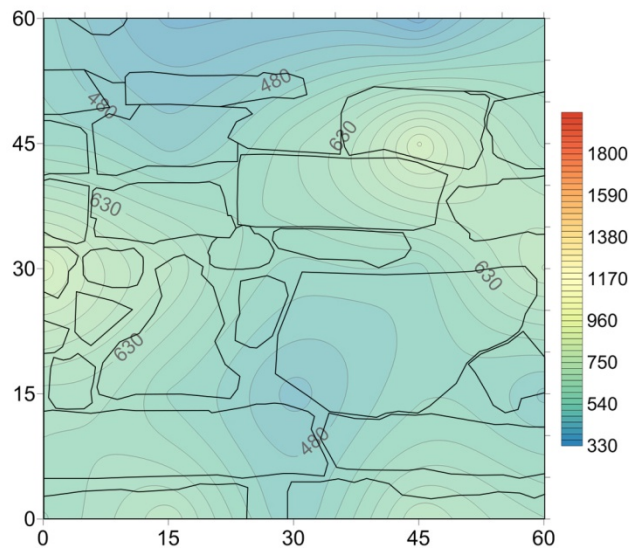
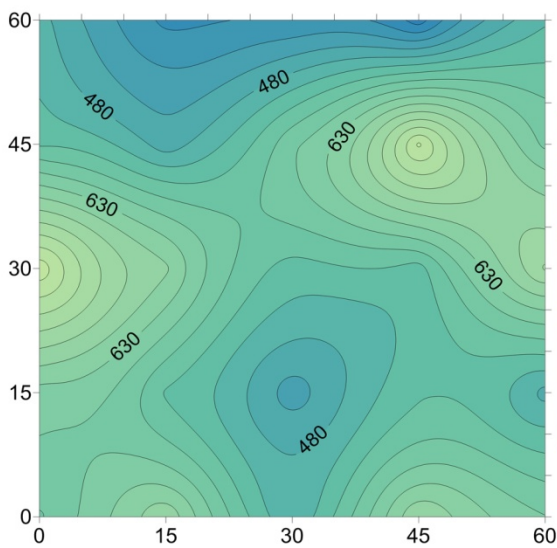
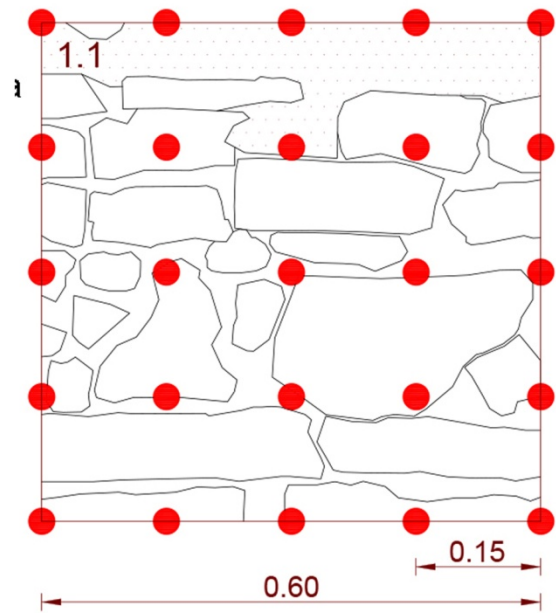
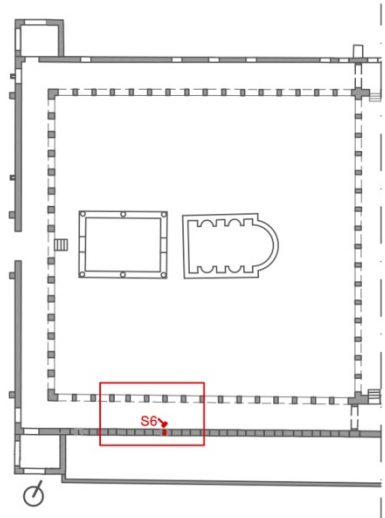
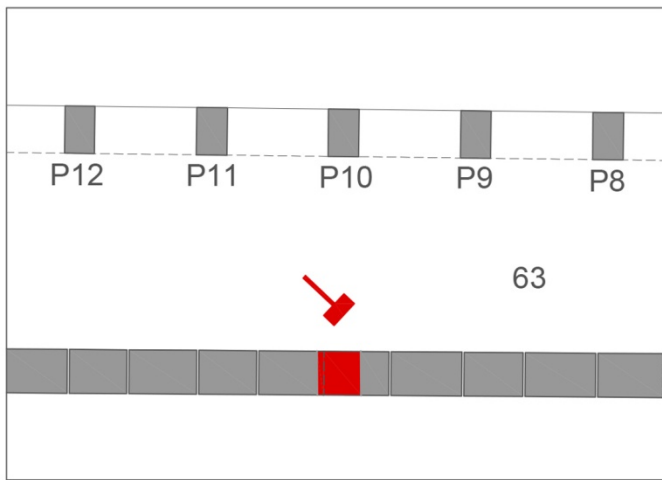


ELABORAZIONE

Prova sonora S5									
Percorso	Spessore [m]	Tempo di volo [s]			Tm [s]	Velocità [m/s]			Vm [m/s]
		T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]		V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	
1.1	0.40	2.27E-03	2.19E-03	2.48E-03	2.31E-03	2.64E+02	2.74E+02	2.42E+02	2.60E+02
1.2	0.40	3.70E-03	3.04E-03	3.02E-03	3.25E-03	1.62E+02	1.97E+02	1.99E+02	1.86E+02
1.3	0.40	2.58E-03	3.04E-03	3.02E-03	2.88E-03	2.33E+02	1.97E+02	1.99E+02	2.10E+02
1.4	0.40	1.61E-03	1.72E-03	1.69E-03	1.68E-03	3.72E+02	3.48E+02	3.55E+02	3.58E+02
1.5	0.40	1.18E-03	1.13E-03	1.16E-03	1.15E-03	5.11E+02	5.32E+02	5.20E+02	5.21E+02
1.6	0.40	1.34E-03	1.40E-03	1.37E-03	1.37E-03	4.47E+02	4.29E+02	4.39E+02	4.39E+02
1.7	0.40	1.32E-03	1.42E-03	1.48E-03	1.41E-03	4.56E+02	4.23E+02	4.05E+02	4.28E+02
2.1	0.40	2.71E-03	2.41E-03	2.27E-03	2.47E-03	2.21E+02	2.49E+02	2.64E+02	2.45E+02
2.2	0.40	2.56E-03	2.31E-03	2.38E-03	2.42E-03	2.34E+02	2.60E+02	2.52E+02	2.49E+02
2.3	0.40	2.49E-03	2.46E-03	2.61E-03	2.52E-03	2.41E+02	2.44E+02	2.30E+02	2.38E+02
2.4	0.40	1.12E-03	1.47E-03	1.21E-03	1.27E-03	5.35E+02	4.08E+02	4.96E+02	4.80E+02
2.5	0.40	1.63E-03	1.24E-03	1.38E-03	1.42E-03	3.69E+02	4.83E+02	4.33E+02	4.29E+02
2.6	0.40	1.96E-03	1.58E-03	1.83E-03	1.79E-03	3.06E+02	3.80E+02	3.27E+02	3.38E+02
2.7	0.40	1.62E-03	1.67E-03	1.59E-03	1.63E-03	3.70E+02	3.59E+02	3.77E+02	3.69E+02
3.1	0.40	3.16E-03	2.72E-03	2.37E-03	2.75E-03	1.90E+02	2.21E+02	2.53E+02	2.21E+02
3.2	0.40	2.87E-03	2.55E-03	2.93E-03	2.78E-03	2.09E+02	2.35E+02	2.04E+02	2.16E+02
3.3	0.40	2.93E-03	2.55E-03	2.60E-03	2.69E-03	2.05E+02	2.36E+02	2.31E+02	2.24E+02
3.4	0.40	1.30E-03	1.12E-03	1.19E-03	1.20E-03	4.62E+02	5.36E+02	5.03E+02	5.01E+02
3.5	0.40	1.53E-03	1.80E-03	1.52E-03	1.62E-03	3.92E+02	3.34E+02	3.95E+02	3.73E+02
3.6	0.40	1.77E-03	1.56E-03	1.61E-03	1.65E-03	3.40E+02	3.84E+02	3.72E+02	3.65E+02
3.7	0.40	2.09E-03	1.88E-03	2.06E-03	2.01E-03	2.88E+02	3.19E+02	2.92E+02	2.99E+02
4.1	0.40	2.03E-03	2.50E-03	2.19E-03	2.24E-03	2.96E+02	2.40E+02	2.74E+02	2.70E+02
4.2	0.40	2.36E-03	2.28E-03	2.69E-03	2.45E-03	2.54E+02	2.63E+02	2.23E+02	2.47E+02
4.3	0.40	2.62E-03	2.25E-03	2.64E-03	2.50E-03	2.29E+02	2.67E+02	2.27E+02	2.41E+02
4.4	0.40	1.28E-03	1.19E-03	1.32E-03	1.27E-03	4.68E+02	5.02E+02	4.54E+02	4.75E+02
4.5	0.40	1.82E-03	1.91E-03	2.07E-03	1.93E-03	3.30E+02	3.14E+02	2.90E+02	3.11E+02
4.6	0.40	1.92E-03	1.90E-03	1.88E-03	1.90E-03	3.12E+02	3.16E+02	3.19E+02	3.16E+02
4.7	0.40	2.04E-03	1.57E-03	1.97E-03	1.86E-03	2.94E+02	3.83E+02	3.05E+02	3.27E+02

PROVA SONICA DIRETTA S6

LOCALIZZAZIONE

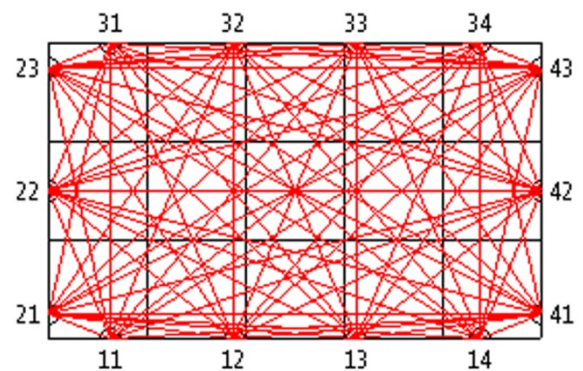
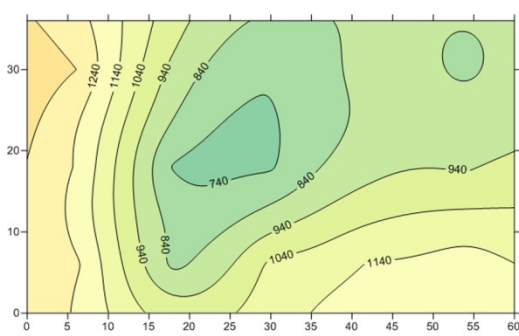
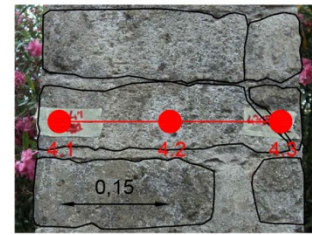
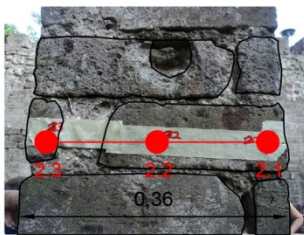
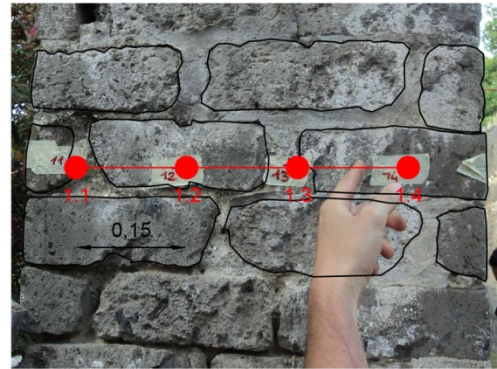
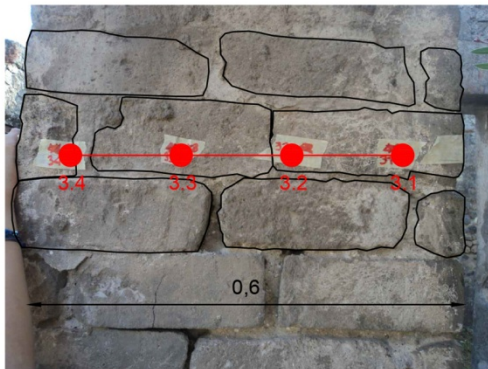
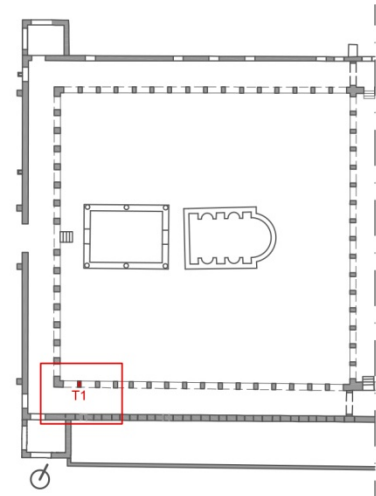
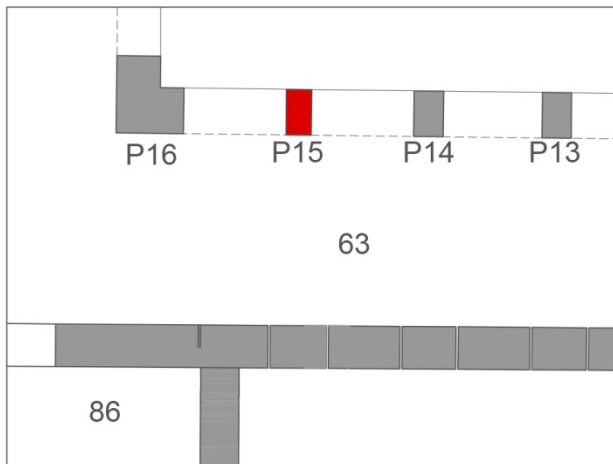


ELABORAZIONE

Percorso	Spessore [m]	Tempo di volo [s]			Tm [s]	Velocità [m/s]			Vm [m/s]
		T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]		V1 [m/s]	V2 [m/s]	V3 [m/s]	
1.1	0.40	1.27E-03	1.29E-03	1.12E-03	1.23E-03	4.71E+02	4.67E+02	5.37E+02	4.91E+02
1.2	0.40	1.66E-03	1.61E-03	2.03E-03	1.77E-03	3.62E+02	3.73E+02	2.96E+02	3.44E+02
1.3	0.40	1.15E-03	1.30E-03	1.12E-03	1.19E-03	5.20E+02	4.61E+02	5.35E+02	5.05E+02
1.4	0.40	1.29E-03	1.06E-03	1.03E-03	1.13E-03	4.64E+02	5.65E+02	5.80E+02	5.36E+02
1.5	0.40	1.21E-03	1.38E-03	1.31E-03	1.30E-03	4.95E+02	4.35E+02	4.59E+02	4.63E+02
2.1	0.40	1.16E-03	9.74E-04	9.26E-04	1.02E-03	5.17E+02	6.16E+02	6.48E+02	5.94E+02
2.2	0.40	7.38E-04	7.19E-04	7.49E-04	7.36E-04	8.13E+02	8.34E+02	8.01E+02	8.16E+02
2.3	0.40	1.05E-03	8.66E-04	1.17E-03	1.03E-03	5.72E+02	6.93E+02	5.13E+02	5.92E+02
2.4	0.40	7.89E-04	7.52E-04	6.42E-04	7.28E-04	7.60E+02	7.98E+02	9.35E+02	8.31E+02
2.5	0.40	8.76E-04	9.13E-04	9.19E-04	9.03E-04	6.85E+02	6.57E+02	6.53E+02	6.65E+02
3.1	0.40	1.16E-03	1.15E-03	1.10E-03	1.14E-03	5.18E+02	5.20E+02	5.45E+02	5.28E+02
3.2	0.40	1.25E-03	1.10E-03	1.08E-03	1.14E-03	4.80E+02	5.46E+02	5.55E+02	5.27E+02
3.3	0.40	9.35E-04	7.94E-04	7.76E-04	8.35E-04	6.42E+02	7.56E+02	7.74E+02	7.24E+02
3.4	0.40	1.02E-03	1.05E-03	8.67E-04	9.78E-04	5.88E+02	5.73E+02	6.92E+02	6.18E+02
3.5	0.40	1.03E-03	1.17E-03	1.16E-03	1.12E-03	5.83E+02	5.11E+02	5.15E+02	5.37E+02
4.1	0.40	1.36E-03	1.43E-03	1.35E-03	1.38E-03	4.43E+02	4.20E+02	4.43E+02	4.35E+02
4.2	0.40	1.06E-03	1.14E-03	1.17E-03	1.12E-03	5.68E+02	5.28E+02	5.13E+02	5.36E+02
4.3	0.40	1.37E-03	1.20E-03	1.28E-03	1.28E-03	4.39E+02	5.01E+02	4.70E+02	4.70E+02
4.4	0.40	1.09E-03	1.01E-03	1.08E-03	1.06E-03	5.52E+02	5.92E+02	5.55E+02	5.66E+02
4.5	0.40	8.31E-04	9.41E-04	8.61E-04	8.78E-04	7.22E+02	6.37E+02	6.97E+02	6.86E+02
5.1	0.40	1.11E-03	1.32E-03	1.34E-03	1.26E-03	5.40E+02	4.56E+02	4.48E+02	4.81E+02
5.2	0.40	8.78E-04	7.89E-04	9.56E-04	8.74E-04	6.83E+02	7.60E+02	6.28E+02	6.90E+02
5.3	0.40	1.02E-03	1.03E-03	9.48E-04	9.99E-04	5.86E+02	5.85E+02	6.33E+02	6.01E+02
5.4	0.40	7.95E-04	9.55E-04	9.48E-04	8.99E-04	7.55E+02	6.28E+02	6.33E+02	6.72E+02
5.5	0.40	7.96E-04	8.27E-04	8.44E-04	8.22E-04	7.54E+02	7.25E+02	7.11E+02	7.30E+02

PROVA TOMOGRAFICA ORIZZONTALE T1

LOCALIZZAZIONE



ELABORAZIONE

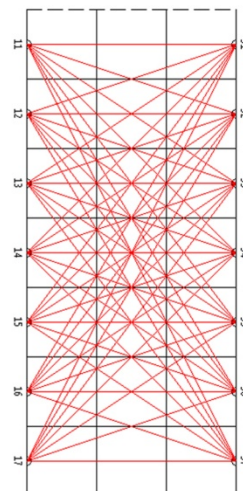
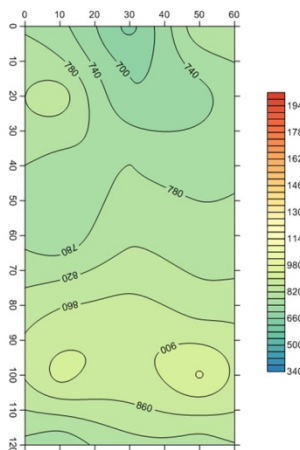
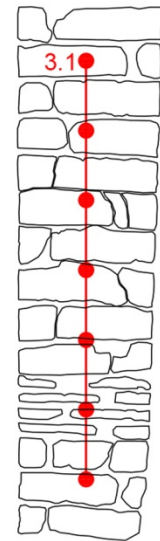
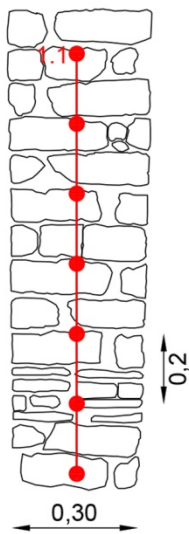
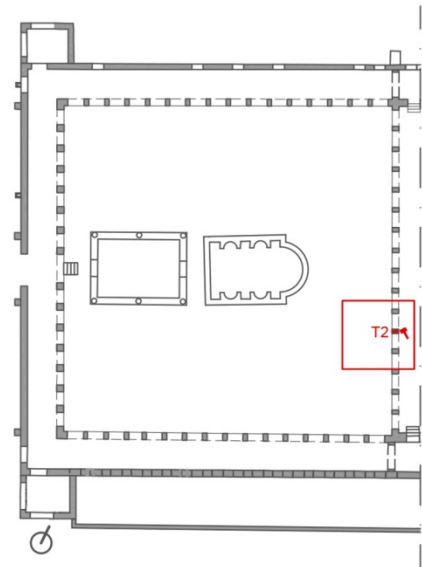
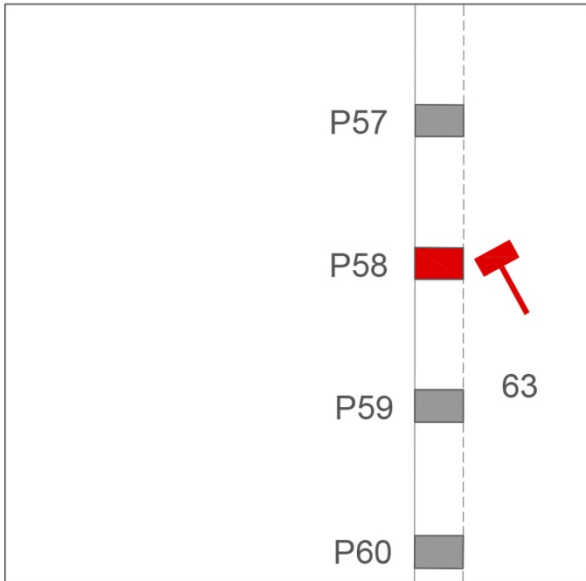
Prova tomografica orizzontale T1									
Punto di Trasmissione	Punto di Ricezione	Coordinate PT e PR [cm]				Tempo di volo [s]			Tm [s]
		X PT	Y PT	X PR	Y PR	T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]	
11	21	7.5	0	0	3	6.09E-05	4.49E-05	5.46E-05	5.35E-05
11	22	7.5	0	0	18	3.83E-05	3.88E-05	3.25E-05	3.65E-05
11	23	7.5	0	0	33	2.06E-04	2.03E-04	2.44E-04	2.18E-04
11	31	7.5	0	7.5	36	2.06E-04	2.10E-04	2.03E-04	2.06E-04
11	32	7.5	0	22.5	36	3.02E-04	3.16E-04	3.18E-04	3.12E-04
11	33	7.5	0	37.5	36	8.42E-04	7.51E-04	7.46E-04	7.80E-04
11	34	7.5	0	52.5	36	7.07E-04	7.38E-04	7.56E-04	7.34E-04
11	41	7.5	0	60	3	4.48E-04	4.37E-04	4.40E-04	4.41E-04
11	42	7.5	0	60	18	5.88E-04	5.61E-04	5.87E-04	5.78E-04
11	43	7.5	0	60	33	6.51E-04	7.32E-04	7.19E-04	7.01E-04
12	21	22.5	0	0	3	5.08E-04	3.66E-04	3.69E-04	4.14E-04
12	22	22.5	0	0	18	2.89E-04	2.78E-04	2.66E-04	2.78E-04
12	23	22.5	0	0	33	6.25E-04	6.24E-04	5.31E-04	5.93E-04
12	31	22.5	0	7.5	36	4.23E-04	4.26E-04	4.18E-04	4.23E-04
12	32	22.5	0	22.5	36	4.80E-04	4.55E-04	4.75E-04	4.70E-04
12	33	22.5	0	37.5	36	4.41E-04	4.48E-04	4.65E-04	4.51E-04
12	34	22.5	0	52.5	36	4.94E-04	4.98E-04	5.52E-04	5.15E-04
12	41	22.5	0	60	3	2.35E-04	2.27E-04	2.25E-04	2.29E-04
12	42	22.5	0	60	18	3.68E-04	3.72E-04	3.56E-04	3.65E-04
12	43	22.5	0	60	33	4.96E-04	5.40E-04	5.45E-04	5.27E-04
13	21	37.5	0	0	3	3.49E-04	4.66E-04	3.56E-04	3.90E-04
13	22	37.5	0	0	18	3.90E-04	6.51E-04	3.71E-04	4.71E-04
13	23	37.5	0	0	33	6.51E-04	6.56E-04	6.39E-04	6.49E-04
13	31	37.5	0	7.5	36	5.07E-04	4.68E-04	4.59E-04	4.78E-04
13	32	37.5	0	22.5	36	4.71E-04	4.53E-04	4.54E-04	4.59E-04
13	33	37.5	0	37.5	36	3.49E-04	3.28E-04	3.40E-04	3.39E-04
13	34	37.5	0	52.5	36	3.88E-04	3.99E-04	3.96E-04	3.94E-04
13	41	37.5	0	60	3	1.02E-04	1.06E-04	9.68E-05	1.02E-04
13	42	37.5	0	60	18	2.13E-04	2.14E-04	2.20E-04	2.16E-04
13	43	37.5	0	60	33	5.09E-04	5.14E-04	5.05E-04	5.10E-04
14	21	52.5	0	0	3	4.79E-04	4.96E-04	4.69E-04	4.81E-04
14	22	52.5	0	0	18	5.63E-04	5.29E-04	5.90E-04	5.61E-04
14	23	52.5	0	0	33	7.30E-04	7.94E-04	7.53E-04	7.59E-04
14	31	52.5	0	7.5	36	7.44E-04	7.04E-04	7.15E-04	7.21E-04
14	32	52.5	0	22.5	36	5.14E-04	5.30E-04	5.29E-04	5.24E-04
14	33	52.5	0	37.5	36	4.00E-04	3.88E-04	3.81E-04	3.90E-04
14	34	52.5	0	52.5	36	5.22E-04	5.25E-04	5.47E-04	5.31E-04
14	41	52.5	0	60	3	1.03E-04	4.22E-05	1.03E-04	7.26E-05
14	42	52.5	0	60	18	8.70E-05	8.58E-05	8.17E-05	8.48E-05
14	43	52.5	0	60	33	5.25E-04	5.27E-04	5.51E-04	5.34E-04
21	31	0	3	7.5	36	2.68E-04	2.79E-04	3.38E-04	2.95E-04
21	32	0	3	22.5	36	4.19E-04	4.90E-04	3.99E-04	4.36E-04
21	33	0	3	37.5	36	5.44E-04	5.77E-04	6.03E-04	5.75E-04
21	34	0	3	52.5	36	6.80E-04	6.71E-04	6.94E-04	6.82E-04
21	41	0	3	60	3	4.24E-04	4.47E-04	4.46E-04	4.39E-04
21	42	0	3	60	18	5.41E-04	5.51E-04	6.13E-04	5.68E-04
21	43	0	3	60	33	6.90E-04	6.56E-04	6.86E-04	6.77E-04

22	31	0	18	7.5	36	1.79E-04	1.94E-04	1.77E-04	1.83E-04
22	32	0	18	22.5	36	2.55E-04	2.26E-04	2.26E-04	2.36E-04
22	33	0	18	37.5	36	4.77E-04	4.66E-04	4.60E-04	4.68E-04
22	34	0	18	52.5	36	6.03E-04	6.12E-04	6.07E-04	6.07E-04
22	41	0	18	60	3	5.39E-04	5.08E-04	5.19E-04	5.22E-04
22	42	0	18	60	18	6.61E-04	6.47E-04	6.52E-04	6.53E-04
22	43	0	18	60	33	6.20E-04	6.29E-04	6.51E-04	6.33E-04
23	31	0	33	7.5	36	1.12E-05	1.40E-05	1.05E-05	1.19E-05
23	32	0	33	22.5	36	9.96E-05	7.42E-05	8.27E-05	8.55E-05
23	33	0	33	37.5	36	3.85E-04	3.97E-04	3.84E-04	3.89E-04
23	34	0	33	52.5	36	5.18E-04	5.06E-04	5.11E-04	5.12E-04
23	41	0	33	60	3	6.98E-04	6.80E-04	6.44E-04	6.74E-04
23	42	0	33	60	18	5.46E-04	5.69E-04	6.35E-04	5.83E-04
23	43	0	33	60	33	5.31E-04	5.36E-04	5.24E-04	5.30E-04
31	41	7.5	36	60	3	6.76E-04	6.71E-04	6.22E-04	6.56E-04
31	42	7.5	36	60	18	7.11E-04	7.08E-04	7.15E-04	7.11E-04
31	43	7.5	36	60	33	7.83E-04	7.39E-04	7.13E-04	7.45E-04
32	41	22.5	36	60	3	5.37E-04	5.42E-04	5.38E-04	5.39E-04
32	42	22.5	36	60	18	5.38E-04	5.33E-04	5.24E-04	5.32E-04
32	43	22.5	36	60	33	5.23E-04	5.44E-04	5.21E-04	5.29E-04
33	41	37.5	36	60	3	3.45E-04	3.57E-04	3.52E-04	3.51E-04
33	42	37.5	36	60	18	2.81E-04	2.88E-04	2.81E-04	2.83E-04
33	43	37.5	36	60	33	1.70E-04	1.74E-04	1.79E-04	1.75E-04
34	41	52.5	36	60	3	5.01E-04	4.75E-04	5.02E-04	4.92E-04
34	42	52.5	36	60	18	1.75E-04	1.69E-04	1.79E-04	1.74E-04
34	43	52.5	36	60	33	7.09E-05	4.49E-05	8.46E-05	6.68E-05

Velocità iniziale stimata [m/s]	Velocità iniziale corretta [m/s]	Velocità calcolata [m/s]	Velocità corretta [m/s]
1.274E+03	1.274E+03	1.258E+03	1.258E+03
9.672E+02	9.672E+02	8.192E+02	8.190E+02
1.028E+03	1.028E+03	1.061E+03	1.061E+03
1.073E+03	1.073E+03	1.146E+03	1.146E+03
1.141E+03	1.141E+03	1.187E+03	1.187E+03
1.283E+03	1.283E+03	1.231E+03	1.231E+03
9.001E+02	9.001E+02	7.321E+02	7.320E+02
8.763E+02	8.763E+02	7.304E+02	7.300E+02
9.445E+02	9.445E+02	9.069E+02	9.060E+02
1.016E+03	1.016E+03	9.297E+02	9.290E+02
1.369E+03	1.369E+03	1.342E+03	1.341E+03
9.911E+02	9.911E+02	9.123E+02	9.120E+02
8.844E+02	8.844E+02	7.478E+02	7.470E+02
9.253E+02	9.253E+02	8.781E+02	8.780E+02
9.196E+02	9.196E+02	8.299E+02	8.290E+02

PROVA TOMOGRAFICA VERTICALE T2

LOCALIZZAZIONE



ELABORAZIONE

Prova tomografica verticale T2									
Punto di Trasmissione	Punto di Ricezione	Coordinate PT e PR [cm]				Tempo di volo [s]			Tm [s]
		X PT	Y PT	X PR	Y PR	T1 [s]	T2 [s]	T3 [s]	
11	31	10	0	10	60	9.67E-04	9.89E-04	9.43E-04	9.66E-04
11	32	10	0	30	60	1.05E-03	9.38E-04	9.34E-04	9.74E-04
11	33	10	0	50	60	1.02E-03	9.20E-04	1.04E-03	9.91E-04
11	34	10	0	70	60	1.13E-03	1.03E-03	1.05E-03	1.07E-03
11	35	10	0	90	60	1.31E-03	1.13E-03	1.30E-03	1.24E-03
11	36	10	0	110	60	1.28E-03	1.18E-03	1.18E-03	1.21E-03
11	37	10	0	130	60	1.50E-03	1.49E-03	1.49E-03	1.49E-03
12	31	30	0	10	60	7.42E-04	7.30E-04	7.71E-04	7.47E-04
12	32	30	0	30	60	7.91E-04	7.93E-04	7.47E-04	7.77E-04
12	33	30	0	50	60	8.14E-04	8.05E-04	8.60E-04	8.27E-04
12	34	30	0	70	60	8.29E-04	1.02E-03	8.93E-04	9.13E-04
12	35	30	0	90	60	1.02E-03	1.13E-03	1.01E-03	1.05E-03
12	36	30	0	110	60	1.00E-03	1.02E-03	1.03E-03	1.02E-03
12	37	30	0	130	60	1.23E-03	1.29E-03	1.26E-03	1.26E-03
13	31	50	0	10	60	1.05E-03	1.12E-03	9.54E-04	1.04E-03
13	32	50	0	30	60	1.12E-03	1.11E-03	1.28E-03	1.17E-03
13	33	50	0	50	60	8.78E-04	8.45E-04	8.52E-04	8.58E-04
13	34	50	0	70	60	8.70E-04	8.73E-04	8.82E-04	8.75E-04
13	35	50	0	90	60	9.69E-04	9.93E-04	1.08E-03	1.01E-03
13	36	50	0	110	60	8.78E-04	8.59E-04	8.51E-04	8.63E-04
13	37	50	0	130	60	1.13E-03	1.18E-03	1.17E-03	1.16E-03
14	31	70	0	10	60	1.25E-03	1.04E-03	1.08E-03	1.12E-03
14	32	70	0	30	60	1.36E-03	9.49E-04	1.02E-03	1.11E-03
14	33	70	0	50	60	1.07E-03	9.12E-04	9.05E-04	9.64E-04
14	34	70	0	70	60	1.10E-03	9.25E-04	1.06E-03	1.03E-03
14	35	70	0	90	60	1.10E-03	9.79E-04	1.06E-03	1.04E-03
14	36	70	0	110	60	8.65E-04	8.58E-04	8.53E-04	8.59E-04
14	37	70	0	130	60	1.02E-03	9.33E-04	1.11E-03	1.02E-03
15	31	90	0	10	60	1.21E-03	1.17E-03	1.06E-03	1.15E-03
15	32	90	0	30	60	1.04E-03	1.17E-03	1.16E-03	1.12E-03
15	33	90	0	50	60	7.38E-04	8.36E-04	8.06E-04	7.93E-04
15	34	90	0	70	60	7.54E-04	7.84E-04	7.18E-04	7.52E-04
15	35	90	0	90	60	8.83E-04	8.96E-04	8.87E-04	8.89E-04
15	36	90	0	110	60	6.79E-04	6.87E-04	6.66E-04	6.77E-04
15	37	90	0	130	60	9.91E-04	1.05E-03	1.06E-03	1.04E-03
16	31	110	0	10	60	1.24E-03	1.24E-03	1.23E-03	1.24E-03
16	32	110	0	30	60	1.03E-03	1.16E-03	1.07E-03	1.08E-03
16	33	110	0	50	60	9.68E-04	9.93E-04	1.06E-03	1.01E-03
16	34	110	0	70	60	7.23E-04	7.07E-04	7.07E-04	7.12E-04
16	35	110	0	90	60	7.02E-04	6.76E-04	6.79E-04	6.86E-04
16	36	110	0	110	60	4.91E-04	4.80E-04	4.66E-04	4.79E-04
16	37	110	0	130	60	6.96E-04	6.27E-04	6.18E-04	6.47E-04
17	31	130	0	10	60	1.37E-03	1.44E-03	1.40E-03	1.40E-03
17	32	130	0	30	60	1.54E-03	1.52E-03	1.55E-03	1.54E-03
17	33	130	0	50	60	1.33E-03	1.46E-03	1.23E-03	1.34E-03
17	34	130	0	70	60	9.16E-04	9.58E-04	9.60E-04	9.45E-04
17	35	130	0	90	60	1.04E-03	1.11E-03	1.02E-03	1.06E-03

17	36	130	0	110	60	6.46E-04	7.09E-04	6.72E-04	6.75E-04
17	37	130	0	130	60	1.07E-03	9.07E-04	9.36E-04	9.71E-04

Velocità iniziale stimata [m/s]	Velocità iniziale corretta [m/s]	Velocità calcolata [m/s]	Velocità corretta [m/s]
7.796E+02	7.796E+02	7.512E+02	7.510E+02
8.284E+02	8.284E+02	8.443E+02	8.440E+02
7.992E+02	7.992E+02	7.642E+02	7.640E+02
7.925E+02	7.925E+02	7.479E+02	7.470E+02
8.526E+02	8.526E+02	8.579E+02	8.570E+02
8.931E+02	8.931E+02	9.168E+02	9.160E+02
7.996E+02	7.996E+02	7.459E+02	7.450E+02
7.055E+02	7.055E+02	6.463E+02	6.460E+02
7.475E+02	7.475E+02	7.030E+02	7.030E+02
8.041E+02	8.041E+02	7.817E+02	7.810E+02
8.284E+02	8.284E+02	8.156E+02	8.150E+02
8.652E+02	8.652E+02	8.734E+02	8.730E+02
8.854E+02	8.854E+02	8.856E+02	8.850E+02
8.439E+02	8.439E+02	8.057E+02	8.050E+02
8.126E+02	8.126E+02	8.151E+02	8.150E+02
7.690E+02	7.690E+02	7.257E+02	7.250E+02
7.943E+02	7.943E+02	7.677E+02	7.670E+02
8.124E+02	8.124E+02	7.889E+02	7.880E+02
8.475E+02	8.475E+02	8.360E+02	8.360E+02
9.068E+02	9.068E+02	9.466E+02	9.460E+02
8.302E+02	8.302E+02	7.968E+02	7.960E+02