

CAPITOLO 6 I rilievi digitali delle fortificazioni di Piombino

6.1 IL CONTRIBUTO DEL RILIEVO SCIENTIFICO ALLA INTERPRETAZIONE DELLE FONTI LEONARDESCHES

Il percorso di ricerca di questa tesi ha finora portato ad affrontare tematiche tra loro molto differenti, che basano la loro trattazione sullo studio e la rielaborazione delle argomentazioni di affermati studiosi in campi disciplinari che interessano i vari periodi della storia, da quella medievale a quella più recente, con l'analisi delle fonti e la documentazione di archivio; la storia delle fortificazioni, proprio nel momento in cui le loro forme si modificano per l'utilizzo delle polveri da sparo; la figura di Leonardo da Vinci, in particolare i suoi studi di architetto, ed ancora più in dettaglio quelli ristretti all'architettura militare; l'inserimento della figura di Leonardo da Vinci in un contesto storico-artistico e in un clima culturale di conoscenza che sono strettamente connesse agli studi di altri importanti figure del Rinascimento, *in primis* Francesco di Giorgio Martini; l'analisi dei disegni, delle rappresentazioni di studio, dei progetti, dei rilievi, dei computi provenienti dalle pagine di annotazioni del maestro, dai suoi "quaderni di viaggio".

Da tutto ciò è emerso finora che la figura poliedrica del maestro di Vinci ha sempre utilizzato tutti gli strumenti che aveva a disposizione nel tempo per approfondire le proprie conoscenze, sia dei confronti dell'architettura militare, di cui non era stato istruito a Firenze nella bottega del Verrocchio, sia nei metodi del progettare fortificazioni moderne, di cui molto è dovuto alla consultazione del trattato di Francesco di Giorgio, sia nello studio delle aree in cui intervenire, approfondendone il sapere tramite i disegni già presenti, oppure analizzando direttamente *in situ* le strutture presenti.

Per comprendere al meglio le intenzioni e gli interventi pensati da Leonardo è necessario conoscere; e se in questo percorso di approfondimento sono stati mostrati i risultati che per lo più provengono dall'analisi documentaria, quello che ancora rimane da illustrare è ciò che le evidenze architettoniche, presenti ancora oggi sul territorio di Piombino, possono mostrare. L'obiettivo quindi di questo ulteriore passo per chiarire i risultati della ricerca è quello di analizzare direttamente le architetture, e da queste collezionare i dati utili a comparare i muri, le caratteristiche più concrete che oggi si possono trovare sul territorio, a quelli indicati dalle fonti storico-documentarie analizzate in precedenza.

Come raccogliere in maniera utile le informazioni che oggi le architetture ci possono fornire, dipende in primo luogo da quali dati vogliamo mostrare; le architetture ad esempio possono dare informazioni legate alla loro storia (ogni segno del tempo lascia una traccia spesso leggibile) oppure informazioni legate alle tecniche costruttive del momento in cui sono state realizzate, al loro stato di conservazione e molto altro ancora... Ma, in primo luogo, per descrivere una architettura si ha la necessità di dimensionarla, di descrivere gli elementi che la compongono, ovvero le pareti, i solai, le coperture ecc., mediante numeri che rappresentano le tre dimensioni principali, ovvero lunghezza, altezza e spessore. L'architettura deve essere in primo luogo individuata e quantificata, allo stesso modo in cui Leonardo stesso si avvicinava alle fortificazioni militari, sia a Piombino che in tutta la durata della sua esperienza al servizio di Cesare Borgia, come testimoniano i numerosi disegni quotati che illustrano i perimetri delle fortezze analizzate.



Fig. 1 (nella pagina precedente) Immagine ottenuta dalla nuvola di punti acquisita con il laser scanner e colorata con dato RGB della Porta di Terra della città di Piombino

Fig. 2 Immagine aerea del centro storico della città di Piombino acquisita con drone, eseguita dal sopra la torre del rivellino della Porta di Terra

L'acquisizione delle informazioni morfologiche che caratterizzano un edificio rientra in una delle fasi fondamentali del rilievo architettonico, dove con il termine rilievo si intende proprio l'individuazione e la trascrizione di quei dati che distinguono un'architettura da un'altra. In questo senso possono essere raccolte indicazioni riguardanti sia le quantità che le qualità di un edificio, dove nel primo caso si intende il rilievo metrico¹. La rappresentazione di queste informazioni dimensionali, che vengono ottenute sul campo, avviene attraverso gli strumenti del disegno, siano essi schizzi di campagna su cui sono annotate le misurazioni effettuate, "eidotipi", come molti ne abbiamo visti nel Codice di Madrid, oppure disegni in scala, correttamente proporzionati in base

alle misure, in questo caso ad esempio si può portare il foglio 115v del Codice Atlantico.

Le informazioni morfologiche acquisite durante un rilievo architettonico vengono quindi trasmesse attraverso il disegno architettonico, tramite le convenzioni della rappresentazione grafica, della "scienza del disegno". Il disegno architettonico è un metodo utile alla rappresentazione di una realtà di un edificio, o meglio è una astrazione dalla realtà, tramite le leggi che sono definite dalla geometria descrittiva, che consente all'architetto di rappresentare un oggetto proporzionato nelle sue dimensioni.

Da queste definizioni basilari, accademiche, che si possono trovare in qualsiasi manuale di disegno architettonico, appare chiaro come sia ben più facile



Fig. 3 Immagine aerea del Castello di Piombino (Cassero Pisano) acquisita con drone, eseguita dall'ingresso alla Fortezza Medicea progettata nel XVI secolo che ne ingloba la struttura

comparare i disegni presenti nel Manoscritto di Madrid, che rappresentano rilievi e progetti per architetture, con altri disegni che rappresentano il rilievo dello stato di fatto delle stesse architetture: i due oggetti avrebbero in questo modo lo stesso linguaggio. Di questa problematica nello studio delle architetture di Leonardo da Vinci era convinto anche Carlo Pedretti, che in uno dei suoi testi sull'architettura militare di Leonardo, ed in particolare focalizzato sulla fortezza della Verruca, era ben felice di aver potuto condurre analisi approfondite sull'edificio proprio grazie al rilievo architettonico che aveva a disposizione².

Il rilievo geometrico si configura infatti come una fase fondamentale all'interno del percorso che porta alla conoscenza di un'architettura³, e non vi può es-

sere analisi completa di un edificio senza che sia stato portato a termine, quindi acquisito, elaborato e restituito graficamente, un corretto rilievo della morfologia dell'oggetto in analisi.

Proprio a causa della complessità delle operazioni, della quantità di dati che sono necessari da raccogliere sul campo, e del tempo da impiegare nella messa a registro di tali informazioni e nella successiva restituzione grafica, raramente negli studi riguardanti i disegni e i progetti di Leonardo sono stati utilizzati rilievi architettonici, ed ancor più raramente chi si occupa della ricerca riesce a dedicarsi in prima persona alla realizzazione dei rilievi⁴.

Gli studi fino ad oggi condotti su Leonardo da Vinci ed il suo intervento a Piombino hanno analizzato



Fig. 4 Immagine aerea del Rivellino della Porta di Terra di Piombino acquisita con drone, si vede sullo sfondo il torrione medievale, il rivellino quadrato di epoca tardomedievale e il rivellino circolare progettato da Rinaldo Orsini, terrapienato nel XVI secolo.

molto nel dettaglio le fonti storiche, i documenti, gli appunti di Leonardo stesso, ma non hanno potuto basare le proprie ipotesi sulla certezza di un rilievo morfologicamente corretto; ovviamente si è potuta consultare la base cartografica della regione Toscana, le Carte Tecniche Regionali, che oggi sono liberamente scaricabili *online*, ma in questo caso il dettaglio di tali disegni non scende fino alla scala architettonica: infatti, anche se le carte geografiche sono state molto utili per tentare di comprendere gli allineamenti progettuali dagli schizzi di Leonardo⁵, allo stesso tempo non è stato possibile individuare sulla carta le mura che tali disegni potavano rappresentare. Se per i disegni planimetrici a scala urbana era comunque possibile avere una idea di ciò che veniva rappresentato,

molto più complesso era analizzare i disegni a scala architettonica, perchè manchevoli di un riscontro da parte di un rilievo affidabile.

Per tutte queste ragioni è stato ritenuto necessario, in modo da concretizzare i dati provenienti dalla ricerca, eseguire aggiornati rilievi architettonici delle fortificazioni di Piombino, o meglio di ciò che ne resta, da utilizzare come strumento conoscitivo di base per sostenere le ipotesi che in parte sono già state descritte in precedenza nel capitolo 5 che tratta l'intervento di Leonardo a Piombino.

6.2 IL PROGETTO DI RILIEVO DI PIOMBINO: SCELTA DELLE PORZIONI DA RILEVARE E DELLE METODOLOGIE

Dopo la necessaria introduzione, utile a comprendere



Fig. 5 Immagine aerea dell'angolo della cittadella di Piombino acquisita con drone, questa immagine permette di comprendere la collocazione della cittadella, su una alta scogliera, affacciata direttamente sul mare.

le motivazioni che hanno spinto a realizzare un rilievo architettonico, si può iniziare adesso a descrivere come si è pensato di eseguirlo. Prima di pensare con quali metodologie e strumentazioni completare le misurazioni⁶, si è dovuto tener presente che nella successiva fase di analisi si sarebbero dovute paragonare con alcune metodologie ben più antiche di rilievo delle architetture, in modo tale da comprendere alcune probabili differenze nella rappresentazione dovute non tanto alla affidabilità delle strumentazioni antiche, quanto alle finalità con cui tali rilievi venivano eseguiti, e quindi con quale approssimazione morfologica. Ecco che con una sola affermazione si sono introdotti numerosi concetti, parlando di affidabilità, finalità ed approssimazione morfologica del rilievo,

che meritano di essere specificati ai fini della trattazione.

Per quanto riguarda l'affidabilità del rilievo è necessario chiarire in primo luogo che non si identifica nella precisione delle misurazioni effettuate in campo: la singola misurazione ha una precisione che deriva dallo strumento utilizzato per eseguirla; senza voler approfondire la tematica dell'errore nel rilievo⁷ si deve invece intendere l'affidabilità delle misurazioni nella loro restituzione rispetto all'oggetto reale. Nel tentativo di paragonare i disegni e i rilievi eseguiti da Leonardo da Vinci con quelli che andremo a descrivere, si deve tenere conto della differenza metodologica con cui sono stati eseguiti, quindi l'affidabilità rispetto all'oggetto reale che dobbiamo aspettarci.

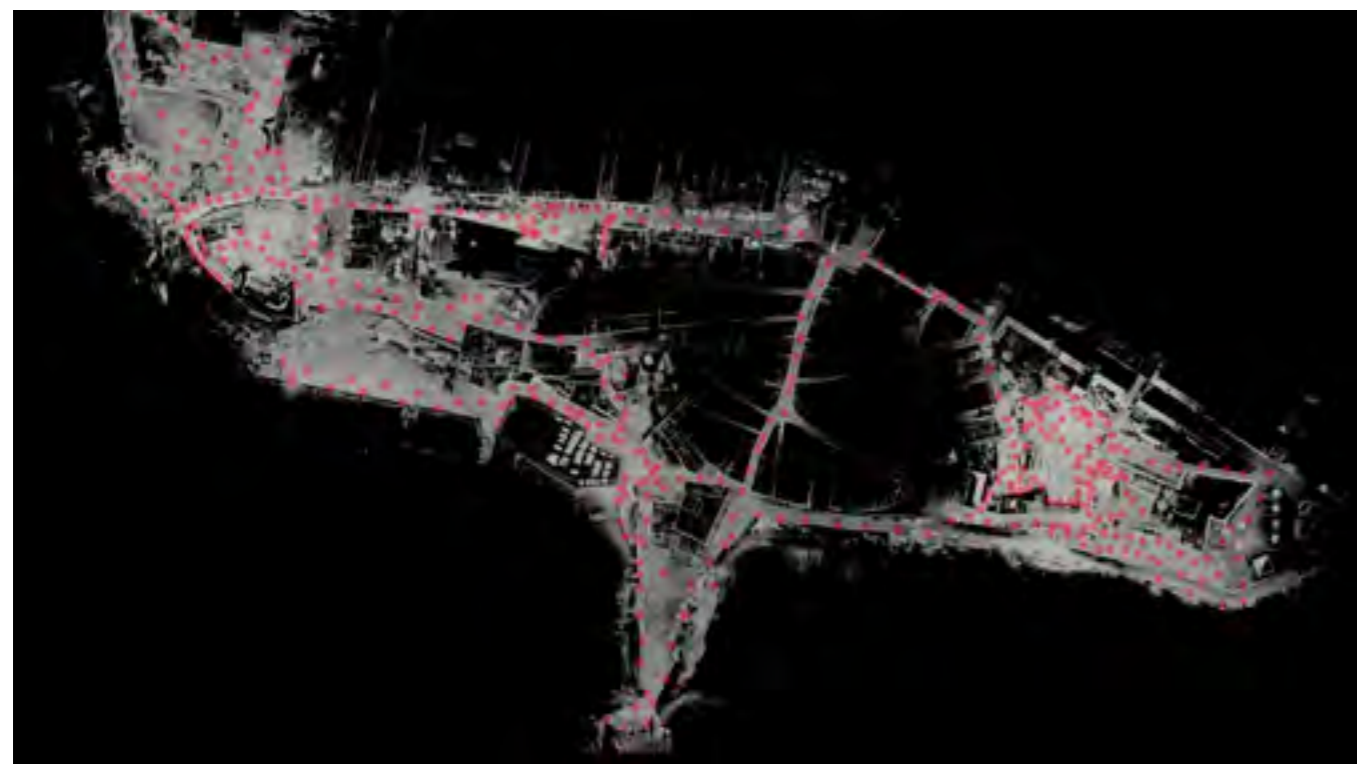
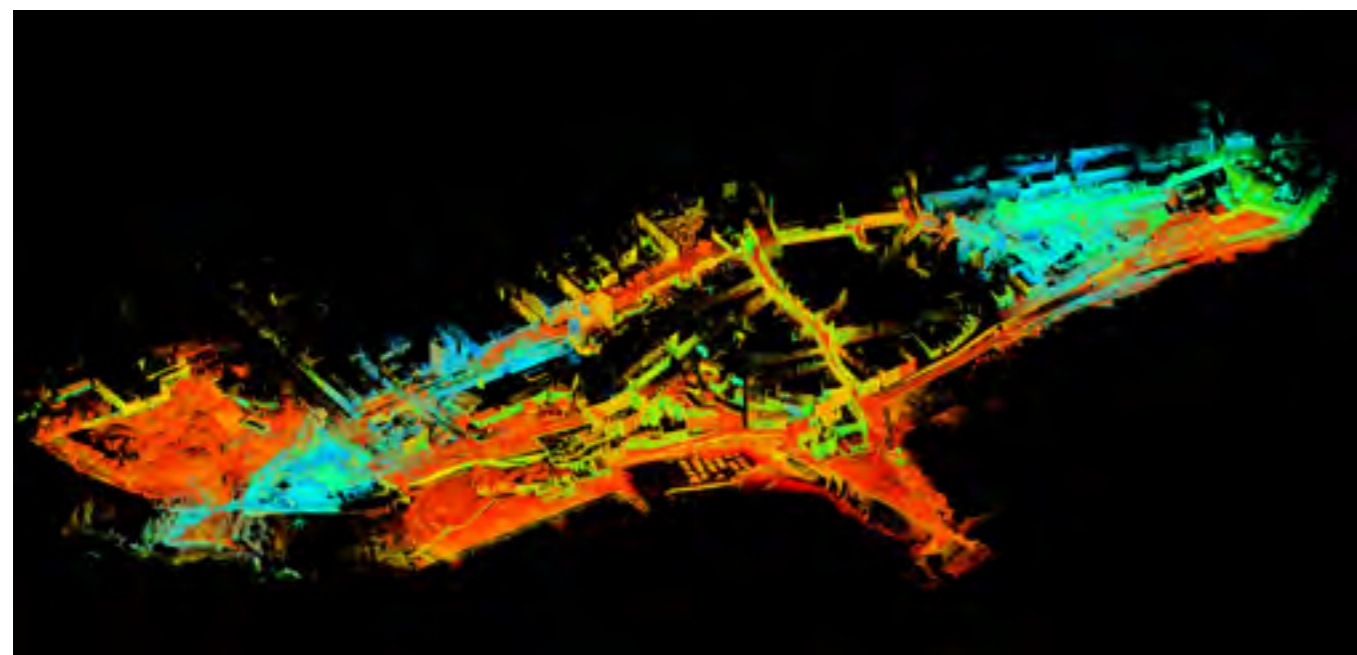


Fig. 6 Vista in proiezione ortografica della nuvola di punti finale, con tutte le scansioni laser registrate, del circuito fortificato di Piombino e delle sue fortificazioni
 Fig. 7 Vista planimetrica della nuvola di punti finale con evidenziate le postazioni laser scanner utili a completare i rilievi degli esterni delle fortificazioni

Il concetto di approssimazione morfologica è una caratteristica fondamentale del disegno architettonico: durante processo di rappresentazione di un oggetto, non viene tracciata ogni singola superficie, ma l'architetto sintetizza i segni in modo da rendere il disegno facilmente comprensibile. Questa operazione di semplificazione della realtà, ovvero la sintesi che la mente realizza nel passare alla carta, avviene attraverso una discretizzazione dei punti necessari a descrivere un oggetto, un'approssimazione della sua morfologia. È necessario quindi leggere anche i disegni di Leonardo con tale visione e comprendere che ogni linea che l'architetto ha tracciato non è casuale ma ha un preciso significato che deriva dalla sintesi effettuata nella trasposizione dalla realtà alla carta.

Il concetto di finalità è infine fondamentale per ricercare l'intenzionalità dell'architetto nell'atto del disegno; il rilievo di un edificio non viene mai eseguito senza uno scopo preciso, che può variare tra numerosissime opzioni: a seconda dello scopo finale a cui il rilievo è preposto, l'attenzione dell'architetto si focalizza sulla rappresentazione delle caratteristiche di un edificio necessarie a consentire quella funzione; si può assumere che lo stesso edificio, a seconda dell'interesse può essere rilevato in modi differenti, tutti corretti nel momento che soddisfano le condizioni della propria utilità. I rilievi delle fortificazioni di Piombino eseguiti da Leonardo avevano allo stesso modo una finalità ben precisa, ovvero la definizione della morfologia delle strutture per impostare e dimensionare un progetto di ammodernamento delle difese: è inutile cercare all'interno di queste rappresentazioni ulteriori informazioni, che avrebbero richiesto al rilevatore uno sforzo sul campo molto maggiore senza portare alcun vantaggio in termini pratici utilità.

Questi concetti sono inoltre tra di loro molto collegati: a seconda della finalità di un rilievo si definisce l'approssimazione che è richiesta nella sua restituzione che a sua volta determina le indicazioni necessarie in termini di affidabilità da ottenere.

Da quanto affermato si evince che ai fini della definizione delle metodologie di misurazione da adottare e dell'impostazione di un corretto progetto di rilevamento, deve essere chiara la finalità che si vuole conseguire con tali misurazioni; il primo passo nella ricerca consiste quindi nella definizione del fine del rilievo, ovvero, in questo caso, il confronto con quanto disegnato e progettato da Leonardo da Vinci per lo studio delle fortificazioni della città di Piombino. Per approfondire le finalità per cui il rilievo deve essere progettato, si deve a sua volta indagare quali tipi di analisi devono o possono essere condotte sugli edifici per fornire ulteriori dati utili a supportare le ipotesi e la trattazione della ricerca storico-documentaria.

La fase di progettazione del rilievo ha dovuto quindi tenere presente tutte queste premesse per giungere alla propria definizione; con l'individuazione della finalità che le misurazioni dovevano garantire, è stato possibile definire in primo luogo una scala di restituzione adeguata dei rilievi: la scala di riduzione con cui i disegni devono essere rappresentati nel caso di Piombino non è unica, e questo dipende dalla necessità di restituire elaborati grafici con un livello di dettaglio molto variegato; allo stesso modo di come Leonardo aveva rappresentato sia le disposizioni urbane delle strutture difensive che i progetti delle opere architettoniche a scale differenti, nel caso del rilievo del circuito murario della città e delle sue opere di fortificazione non poteva essere adottata un unico livello di dettaglio. È stato quindi necessario prevedere almeno due livelli di approfondimento nel rilievo: un primo a scala urbana, che permettesse di individuare in planimetria lo sviluppo geometrico del perimetro fortificato e le relazioni spaziali che intercorrono tra i punti focali delle sue architetture, e che allo stesso tempo fornisse indicazioni su come le architetture si relazionano con lo spazio circostante; queste sono le stesse operazioni che Leonardo si è trovato a trascrivere nei suoi appunti in occasione della sua visita a Piombino quando per prevedere un progetto funzionale dimostra la pericolosità di un attacco dall'altezza

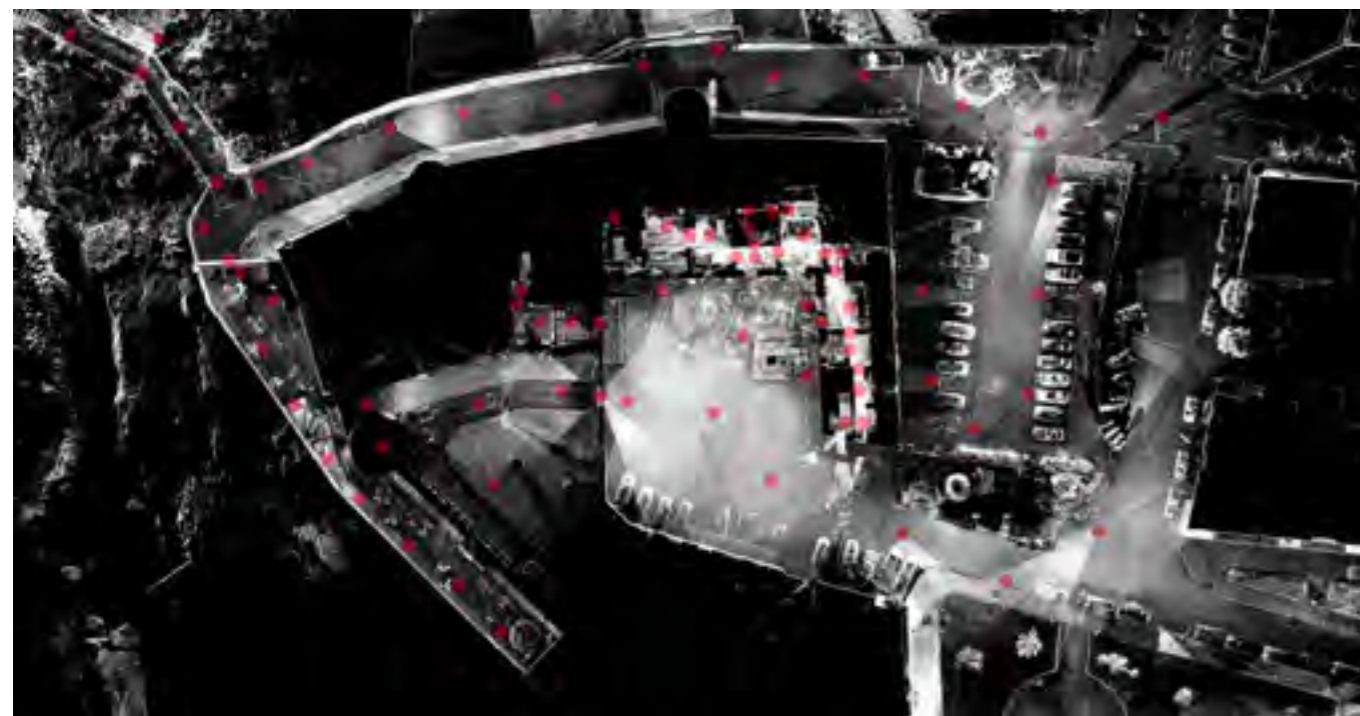
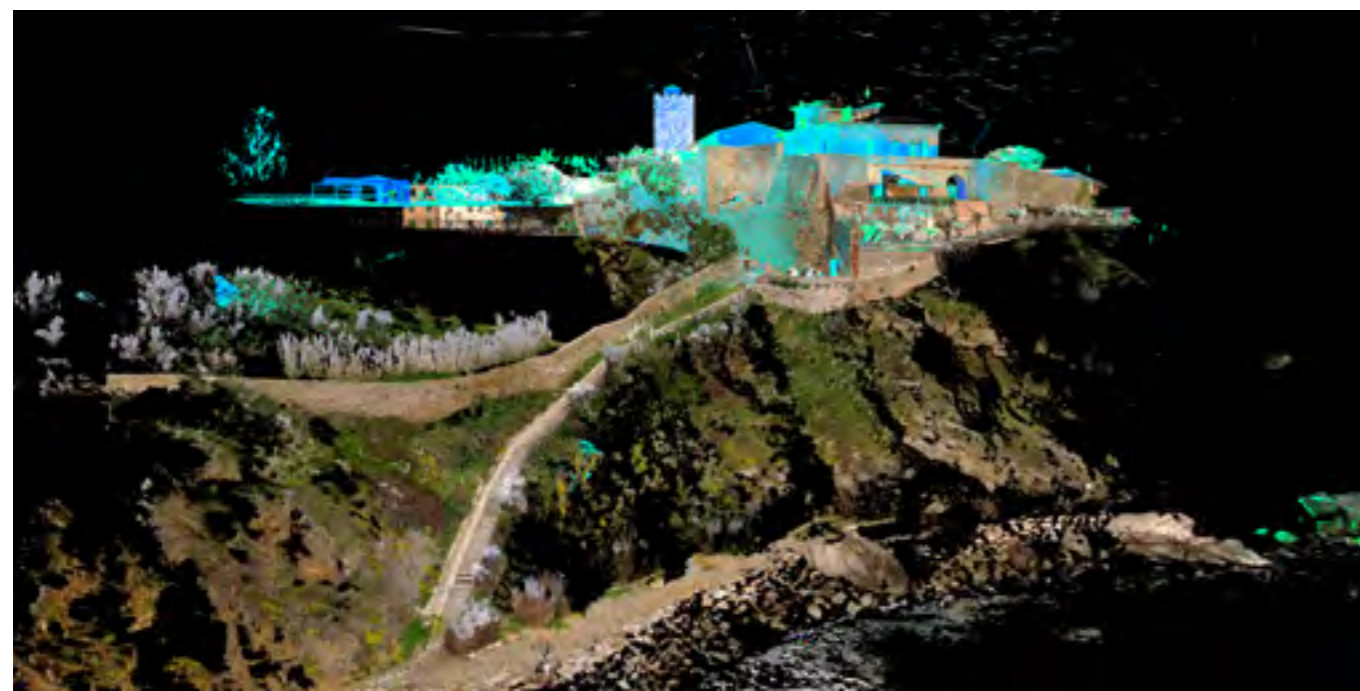


Fig. 8 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti della cittadella, dove si evidenzia la caratteristica posizione sulla cima della scogliera

Fig. 9 Vista planimetrica della nuvola di punti della cittadella, con evidenziate le postazioni laser scanner utili a completare i rilievi degli interni e degli esterni

del poggio di Santa Maria e studia le relazioni tra le torri e i rivellini per prevedere un perimetro fortificato protetto dal fiancheggiamento laterale alla maniera moderna; un secondo livello di dettaglio interessa invece la scala architettonica, in modo che consenta di condurre analisi sul singolo fabbricato. In questo caso la prima e immediata operazione utile allo studio sulle architetture leonardiane consiste nel confronto tra i disegni, i rilievi e i progetti, eseguiti nel 1504 sui differenti edifici ed un confronto morfologico e volumetrico su come oggi appaiono. Visto che comunque è evidente, e anche naturale, che le architetture abbiano subito dal tempo di Leonardo ad oggi numerose modifiche, è molto utile prevedere che gli elaborati grafici necessari a descrivere la morfologia del fabbricato siano pensati, fin dalla fase di progetto di rilievo, per ospitare altri tipi di analisi di approfondimento utili alla comprensione dell'evoluzione dell'edificio nel tempo: in questo caso, come abbiamo visto fare per l'edificio del Castello⁸ in occasione dei lavori di restauro condotti ad inizio del secolo, il rilievo architettonico è stato studiato in modo tale da prevedere un suo utilizzo come base morfologica su cui trascrivere i risultati provenienti dalle analisi archeologiche⁹, stratigrafiche da condurre sulle mura.

Per riassumere è stato compreso che il rilievo delle fortificazioni di Piombino deve essere affrontato a due differenti livelli di dettaglio, uno urbano (scala 1:500/1:1000) e l'altro architettonico (scala 1:50).

Ora che sono chiare le finalità del rilievo e quindi la scala di restituzione a cui deve essere acquisito e rappresentato, rimane da prevedere le metodologie di acquisizione delle informazioni morfologiche da adottare. La caratteristica fondamentale da dare al nostro rilievo è la possibilità di utilizzo sia a scala architettonica che urbana.

Lo stato dell'arte delle strumentazioni di misurazione, da diversi anni, si è ormai improntata per acquisire i dati morfologici dei manufatti sull'utilizzo di laser scanner; la gestione del rilievo tramite queste

strumentazioni è stata in passato molto approfondita nella ricerca dal Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze attraverso procedure che sono ormai in uso da quasi un ventennio e ben consolidate¹⁰. Gli strumenti di misurazione laser utilizzano ormai sistemi di acquisizione altrettanto ben sviluppati nel tempo, dove comunque il progresso tecnologico sta portando piccole e rapide modifiche delle componenti *hardware* e *software* negli strumenti che comportano continue migliorie ai sistemi di acquisizione e elaborazione dati, lasciando sostanzialmente invariato il principio di misurazione di base. Le modifiche nel campo delle strumentazioni laser scanner si concentrano sull'evoluzione, il miglioramento dei sistemi di acquisizione in movimento (*laser mobile*) che fino ad ora, nonostante il grado di precisione raggiunto nelle misurazioni di alcuni di essi sia buono, soprattutto a causa dei costi proibitivi e dell'ingombro delle strumentazioni, ne hanno fortemente limitato l'utilizzo sia da parte dei professionisti che nella ricerca universitaria in ambito architettonico.

Non è stato ritenuto opportuno l'utilizzo sperimentale di sistemi *laser mobile* ai fini della nostra ricerca, specialmente a causa dello scarso livello di dettaglio che questi strumenti raggiungono sulle superfici rilevate cosa che ne pregiudica l'utilizzo a scala architettonica, mentre sarebbe stato interessante utilizzare strumentazioni di alta gamma per il rilievo del perimetro fortificato a scala urbana, cosa che avrebbe notevolmente ridotto i tempi di acquisizione e elaborazione dei dati, ma i costi non avrebbero permesso di condurre tale ricerca.

Una delle peculiari caratteristiche degli strumenti di acquisizione laser scanner consiste nel riuscire a rilevare non solo l'edificio di interesse, ma anche tutto il contesto in cui è inserito: non sono in grado di valutare cosa misurare, ma applicano un sistema di acquisizione massivo di tutto ciò che si trova attorno alla loro postazione, cosa che è stata in questo caso molto utile ed ha consentito di ottenere simultaneamente un

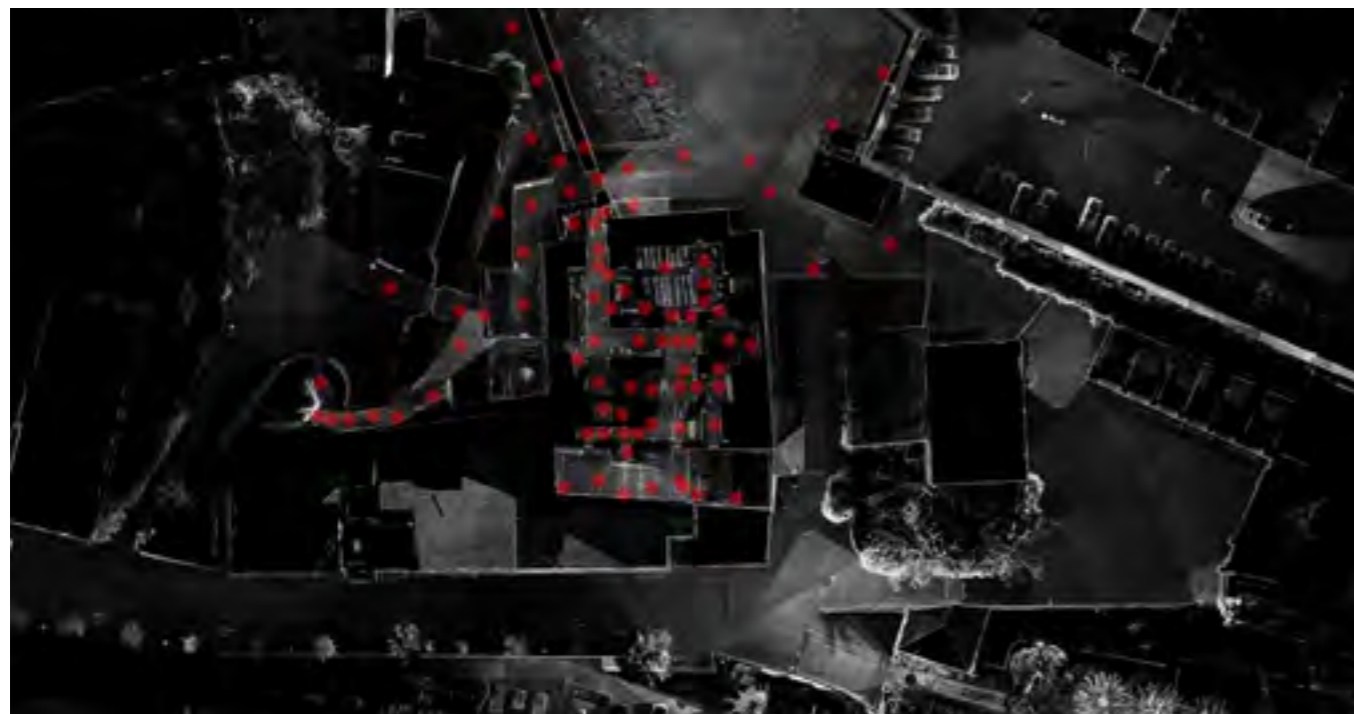


Fig. 10 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti del castello, racchiuso dai bastioni moderni della fortezza medicea.

Fig. 11 Vista planimetrica della nuvola di punti dell castello con evidenziate le postazioni laser scanner utili a completare i rilievi degli interni e degli esterni

rilievo altamente dettagliato alla scala architettonica e tutti gli elementi necessari a restituire il circuito fortificato a scala urbana.

Per completare le informazioni morfologiche con indicazioni legate alla matericità delle architetture è stato previsto inoltre di eseguire contemporaneamente il rilievo fotografico, tramite procedure di acquisizione S.f.M, di tutte le strutture rilevate metricamente con il laser scanner. Le acquisizioni fotografiche sono state progettate per realizzare modelli tridimensionali che allo stesso modo delle nuvole di punti del dato laser scanner consentissero di visualizzare e restituire i disegni necessari per la rappresentazione grafica degli elaborati architettonici. L'utilizzo delle strumentazioni fotografiche per realizzare modelli digitali è una tecnica che è stata molto sviluppata nell'ultimo decennio; rispetto a quanto era possibile vedere pochi anni fa i modelli fotografici, altrimenti detti fotomodellazione¹¹, stanno progressivamente raggiungendo precisioni morfologiche decisamente più elevate¹².

Il rilievo fotografico è stato eseguito sia da terra, con tradizionali camere fotografiche, che in alcuni casi specifici da drone, in modo da riuscire a riprendere alcune porzioni di architettura altrimenti non visibili da terra.

6.3 METODOLOGIE DI RILIEVO

Il rilievo digitale del perimetro fortificato e delle sue principali architetture della città di Piombino, ha richiesto di progettare diverse campagne di misurazione, soprattutto a causa dell'estensione del centro storico, che lo rende uno dei castelli medievali più grandi della Val di Cornia¹³, e della complessità distributiva che le architetture principali hanno acquisito.

In totale sono state effettuate tre missioni, ognuna della durata di una settimana circa, per acquisire tutti i dati morfologici necessari. Una prima missione è stata eseguita in Aprile 2018 e si è concentrata sul rilievo della cittadella degli Appiani, comprendendo gli interni del Museo Archeologico¹⁴, della chiesa della Madonna di Cittadella, e del giardino di pertinenza

della fondazione Kepha. Contemporaneamente sono stati condotti i rilievi della piattaforma di Nanni Ungaro, del tratto di muro che la connettono alla cittadella e del rivellino della Porta di San Francesco (porta settentrionale o di Terra). La seconda missione è stata condotta a Novembre 2018, quando si è rilevato il castello di Piombino, all'interno del quale si trova un museo della città¹⁵, e la fortezza medicea che lo racchiude. Infine in Aprile 2019 sono stati conclusi i rilievi con l'acquisizione di tutti i tratti di collegamento tra le strutture, ricalcando il tracciato delle mura demolite, sia sul fronte di terra che su quello meridionale, lato mare, non tralasciando la piazza Bovio e il promontorio, dove un tempo sorgeva la Rocchetta meridionale, e il porto vecchio di Piombino; sempre ad Aprile, dopo aver riscontrato al presenza di un interessante paramento murario di fronte alla cittadella, nell'area di pertinenza delle scuole pubbliche di Piombino e della vicina chiesa dedicata oggi a San Francesco, si è deciso di rilevare tutta la superficie che in epoca del dominio francese ospitava un puntone fortificato¹⁶. Ciascuna di queste missioni è stata svolta all'interno di un workshop di Rilievo dell'Architettura del DIDA¹⁷; le missioni che sono state progettate per la realizzazione dei rilievi hanno di conseguenza dovuto tener presente che una parte del tempo sarebbe stato impiegato per la didattica, ovvero e far prendere confidenza agli studenti con le metodologie e le applicazioni del rilievo digitale in ambito architettonico.

In sostanza il progetto di rilievo del perimetro fortificato di Piombino e delle sue architetture è stato focalizzato in un primo momento sulle sue architetture, dato che il tempo di acquisizione da dedicarvi era decisamente maggiore, successivamente, una volta realizzati i singoli modelli degli edifici a carattere militare, è stato completato il perimetro, collegando tra loro i *database* delle fortificazioni.

Le campagne di rilievo sono state condotte, come chiarito in precedenza, con strumentazioni laser scanner fisse, differenti a seconda delle caratteristiche de-



Fig. 12 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti dell rivellino di Rinaldo Orsini, con la porta medievale che si eleva al centro

Fig. 13 Vista planimetrica della nuvola di punti del rivellino con evidenziate le postazioni laser scanner utili a completare i rilievi degli interni e degli esterni

gli oggetti da rilevare: mentre per il rilievo delle architetture si è preferito utilizzare uno strumento che fosse rapido e maneggevole e che fornisse nuvole di punti gradevoli anche dal punto di vista della visualizzazione, con una camera integrata per colorare con il valore RGB i punti acquisiti da ciascuna stazione, per il rilievo urbano, dove non è stato previsto in fase di restituzione di indagare nel dettaglio le porzioni di nuvole ottenute, si è preferito utilizzare dati provenienti da scanner senza fotocamera ma più precisi nelle misurazioni e con maggiore portata. In particolare sono stati utilizzati tre scanner differenti¹⁸: per il rilievo delle architetture è stato utilizzato uno scanner Faro M70, per il rilievo urbano invece due modelli Z+F, in alcuni casi un Imager 5006h, mentre per rilievi che richiedevano una maggiore portata, un Imager 5010X¹⁹. Per quanto riguarda il rilievo fotografico, è stato scelto di realizzare modelli tridimensionali delle sole architetture, senza documentare con ricostruzioni tridimensionali il loro ambiente urbano circostante, utilizzando tradizionali camere fotografiche digitali. Nonostante per gli edifici fosse stato realizzato un rilievo laser scanner utilizzando strumenti con camera fotografica integrata, ai fini della restituzione grafica e della correttezza formale del rilievo è necessario intervenire ed integrare i dati con un rilievo fotografico, in modo tale da realizzare elaborati grafici utili a rappresentare la matericità delle superfici con una texture appropriata²⁰.

6.3.1 RILIEVO LASER SCANNER

Il rilievo laser scanner di Piombino e delle sue fortificazioni è stato pensato secondo un flusso di lavoro ormai studiato e consolidato negli anni da parte del gruppo di ricerca del DiDA²¹; secondo questo schema operativo il rilievo digitale si compone di varie fasi, ad ognuna delle quali è necessario prestare l'opportuna attenzione per ottenere un rilievo finale affidabile. Questo metodo è stato sviluppato proprio in funzione di garantire la correttezza metrica del rilievo, quando, durante le prime applicazioni in campo

architettonico degli strumenti laser scanner²², i ricercatori si resero conto che nonostante che gli strumenti a disposizione fossero altamente precisi ed affidabili nelle loro misurazioni, altrettanto non poteva esser detto dei modelli definitivi ottenuti dall'allineamento delle varie postazioni, in cui lo strumento aveva acquisito una nuvola di punti, che al contrario presentavano forti disallineamenti. È dunque emersa la necessità di protocollare una procedura metodologica che rendesse valido il dato del rilievo e ne certificasse l'attendibilità, concentrandosi sul migliorare il risultato ottenuto nella registrazione delle scansioni.

Secondo questo sistema il processo di rilievo si divide in fasi: la progettazione del rilievo, da effettuarsi in base alle esigenze programmate nella ricerca, alla natura dei luoghi e degli edifici con cui ci si deve interfacciare; l'acquisizione del rilievo, con le procedure di misurazione da effettuare in sito; l'elaborazione dei dati e la messa a registro, da eseguire in laboratorio; il collaudo del rilievo ottenuto, analizzando la registrazione definitiva, ma anche durante la stessa fase di registrazione per validare gli allineamenti; la restituzione grafica del modello registrato, ed una ulteriore e finale validazione della restituzione grafica. Ciascuna di queste fasi è stata adeguatamente sperimentata e descritta durante le molteplici ricerche eseguite, ed è stata affinata in base alle esperienze accumulate ed al rapido evolversi delle strumentazioni, sia a livello di *hardware* e *software* degli scanner, che oggi giorno, anno dopo anno, vengono aggiornati con piccole modifiche, che dei *software* di gestione delle nuvole di punti, che da un lato si aggiornano insieme alla realizzazione di nuovi strumenti, dall'altro grazie al progredire delle tecnologie sono divenuti molto più stabili e performanti.

Fase di progettazione del rilievo

La fase di progettazione del rilievo laser scanner è necessaria a preparare con le dovute considerazioni la missione *in situ* in modo tale da scongiurare eventuali problemi che causino l'inadeguatezza dei dati acquisiti; è tra tutte la più complessa in quanto rich-

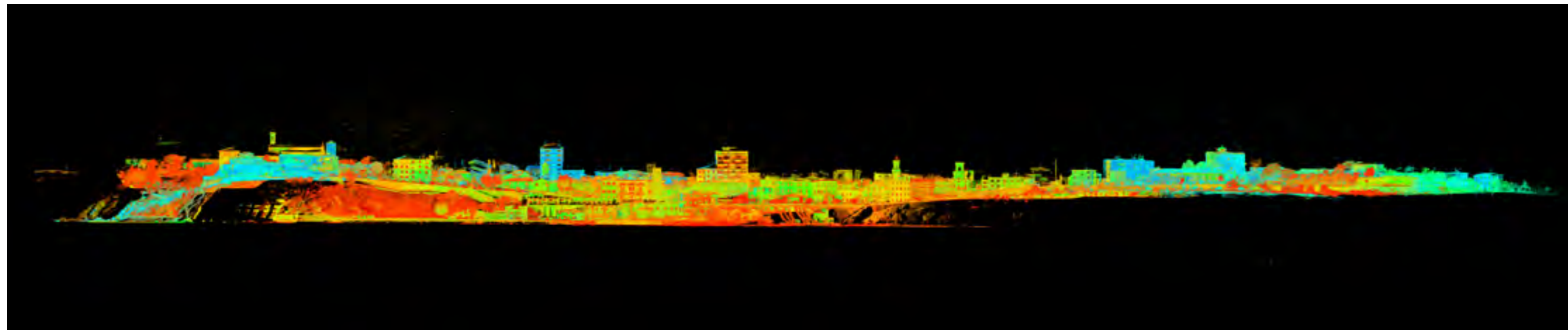


Fig. 14 Vista in proiezione ortografica della nuvola di punti di Piombino, vista frontalmente in modo tale da evidenziare la disposizione altimetrica dei punti focali delle difese della città: è evidente come sia il castello che la cittadella si trovino in posizione dominante sia sulla città, che sul territorio circostante

iede competenze che per lo più si apprendono con l'esperienza e dipendono da fattori molto eterogenei, alcuni dei quali sono già stati introdotti nei paragrafi precedenti mentre si analizzavano le finalità del rilievo di Piombino.

La progettazione del rilievo richiede di soffermarsi sia su questioni prettamente tecniche-strumentali, che su problemi essenziali e quindi legati alle finalità delle operazioni da eseguire; dal punto di vista tecnico le considerazioni devono ricadere sulla definizione di quali strumentazioni adottare per ottenere un buon rilievo, dal momento che, come si accennava in precedenza, esistono numerose strumentazioni laser scanner differenti (laser scanner mobile, fissi, aerei ecc.); oppure qualora si sia deciso, come in questo caso, di adottare per determinate ragioni una tipologia particolare di strumento, all'interno di questa tipologia (ad esempio nel nostro caso gli scanner fissi a testa rotante) esistono numerose possibilità di scelta ognuna capace di soddisfare al meglio particolari

esigenze nel campo della misurazione. Allo stesso tempo deve essere deciso se le strumentazioni laser scanner da sole riescono a garantire l'affidabilità del rilievo o se l'oggetto delle misurazioni presenta alcune complessità tali da richiedere l'utilizzo di uno strumento di supporto, sia esso un GPS, oppure stazioni totali o altri sistemi²³. La scelta della tipologia di strumentazione da adottare dipende soprattutto dalle condizioni intrinseche ma anche da quelle a contorno, considerando l'ambiente circostante, in cui si trova l'oggetto che deve essere rilevato: ad esempio non tutte le architetture sono facilmente avvicinabili, o interamente misurabili direttamente.

Le finalità del rilievo inoltre influenzano notevolmente la progettazione del rilievo anche dal punto di vista strumentale: ad esempio non tutti gli strumenti sono in grado di garantire determinate precisioni nella misurazione, quindi in ambito architettonico non esiste uno strumento che sia adatto per tutte le esigenze; nel caso di necessità di indagine strutturale²⁴

è ormai consuetudine utilizzare il dato strumentale per estrarre le mappe di deformazione delle superfici, ma non tutti gli strumenti sulla singola scansione possono garantire affidabilità millimetrica, ancora meno nel caso della registrazione di più stazioni registrate assieme dove il singolo errore strumentale va a sommarsi con quello delle stazioni successive.

La scelta delle finalità del rilievo inoltre va a definire la scala di restituzione del rilievo stesso, cosa che influisce notevolmente sulla definizione delle metodologie di ripresa che deve essere decisa in fase di acquisizione del dato: in fase di programmazione si deve comunque tener conto della scala di restituzione finale per prevedere adeguatamente le tempistiche necessarie per eseguire le misurazioni, specialmente nel caso della realizzazioni di grandi database, come in questo caso, dove l'elevato numero di scansioni potrebbe portare in caso di errore di programmazione o ad un'eccessiva quantità di tempo da aggiungere alle missioni programmate o ad un'eccessiva man-

canza di dato acquisito nel caso di impossibilità di prolungare la permanenza sul campo.

Nel caso specifico del rilievo di Piombino, abbiamo visto nei paragrafi precedenti a quale fine era preposto il rilievo, che ha richiesto l'utilizzo di due differenti scale di rappresentazione, una architettonica, predisposta ad ospitare le future analisi sulle muraure, in scala almeno 1:50, ed una urbana, che restituisca gli allineamenti di progetto. Sulla base delle planimetrie regionali e da una prima ricognizione sul posto, è stato possibile preventivare il numero di stazioni laser scanner da eseguire per ciascuna campagna in modo tale da rispettare il piano di acquisizione prefissato. La necessità di uno strumento di rapida acquisizione, che consentisse inoltre di ottenere delle nuvole di punti tridimensionali di gradevole visualizzazione, ovvero con dato colore integrato, ma che allo stesso tempo fosse leggero, in modo tale da facilitare le operazioni di messa in stazione, soprattutto nel caso delle architetture che presentavano un



Fig. 15 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti, integrata di dato RGB, della porzione di cortina muraria rimasta del fronte di terra della città

grande numero di stanze interne, ha determinato che la scelta ricadesse su un Faro M70 nel caso del rilievo architettonico: uno strumento che non garantisce una portata superiore ai 70 metri, ma che è molto leggero, con una precisione nelle misurazioni accettabile per la scala di restituzione (+/- 0,5 cm sul punto misurato a 25 metri di distanza dal sensore²⁵). Allo stesso tempo la necessità di una maggiore precisione nelle lunghe distanze, senza l'utilizzo del colore, ha portato ad utilizzare uno Z+F Imager 5006h per il rilievo urbano, insieme ad uno Z+F Imager 5010X nelle zone dove era richiesta una gittata ed una precisione maggiore (il primo ha precisioni di +/-0,3cm sul punto misurato a 25 metri mentre il secondo addirittura sotto 1mm). L'utilizzo di uno strumento a lunga gittata (Z+F 5010X riesce a raggiungere i 180 metri) ha consentito la ripresa di alcune aree complesse, perché non facilmente raggiungibili, come la scogliera su cui si fonda la cittadella degli Appiani²⁶.

La fase di acquisizione del dato, i rilievi sul campo Le operazioni di acquisizione sul campo sono in gran parte dettate dalle decisioni prese in fase di programmazione, eccezion fatta per quelle situazioni in cui, analizzando aree oppure edifici sconosciuti, ci si rende conto di non aver considerato alcune questioni in ufficio, come ad esempio l'eventuale presenza di ulteriori spazi su cui eseguire le misurazioni. Dal punto di vista pratico in fase di acquisizione si imposta la struttura del database di informazioni che sarà successivamente elaborata al computer. È necessario in questo caso programmare in modo chiaro le operazioni di scansione e archiviare le scansioni seguendo una logica facilmente ricostruibile lontano dal luogo dei rilievi: può sembrare una banalità, ma la realizzazione di un archivio superiore alle 500 scansioni come quello di Piombino richiede una grande attenzione durante la nomina delle scansioni e delle cartelle di archivio per evitare di perdere il dato o di

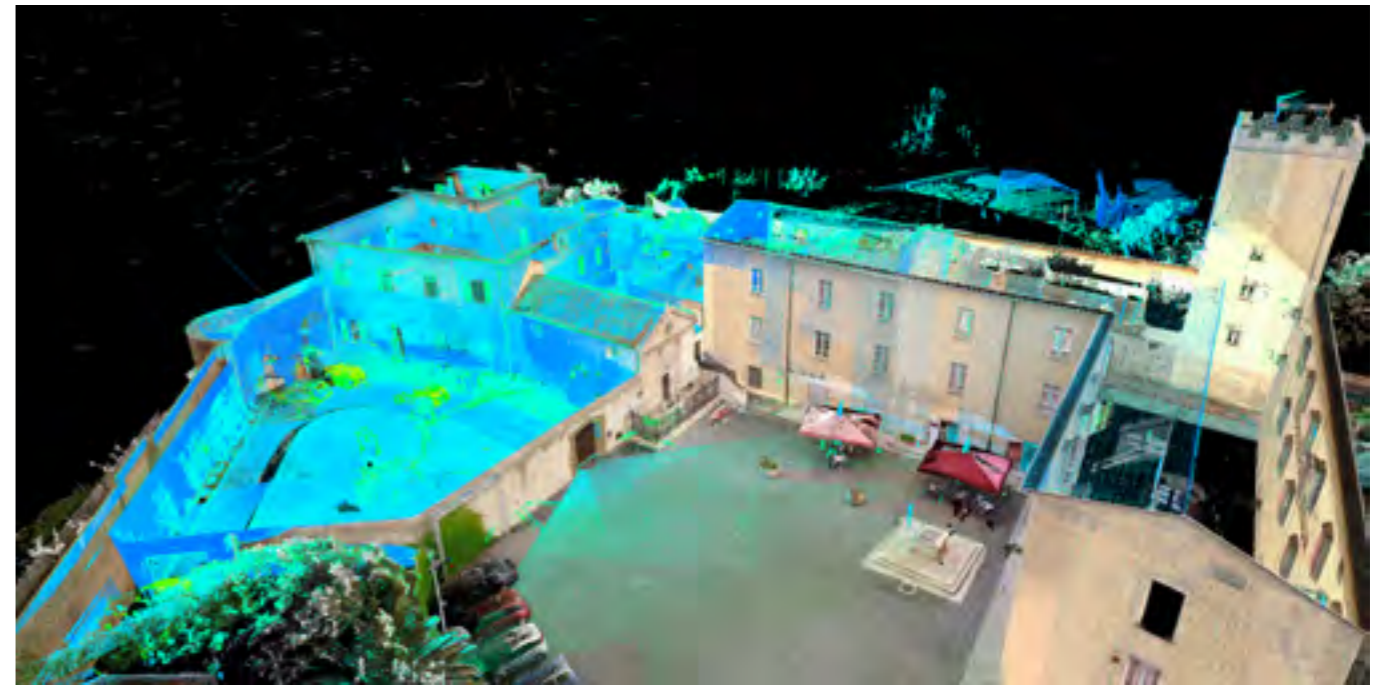


Fig. 16 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti, integrata in parte di dato RGB, della piazza interna alla cittadella, dove oggi si può accedere al Museo Archeologico, alla Cappella Rinascimentale e alle due ville private.

sprecare successivamente molto tempo per ritrovare dati all'interno delle cartelle. È buona prassi eseguire sul campo di rilievo degli eidotipi planimetrici che rappresentano le architetture rilevate su cui marcare le postazioni di scansione e il nome che gli è stato assegnato (solitamente un numero) in modo tale da facilitare e abbreviare la successiva fase di registrazione del dato.

Le operazioni da eseguire sul campo consistono per lo più nello stabilire le caratteristiche delle scansioni, ovvero la densità dei punti acquisiti, la precisione nelle misurazioni, a volte le caratteristiche della fotocamera integrata, il posizionamento delle stazioni e la distanza da mantenere sia con l'edificio da rilevare sia con la scansione eseguita in precedenza.

Per quanto riguarda la densità dei punti da acquisire, conviene fare alcune considerazioni che permettono di capire come non esista una regola fissa nello stabilire questo parametro ma che derivi da una serie di

compromessi scelti dall'operatore: è chiaro che una maggiore definizione, quindi una maggiore densità di punti misurati, porti ad ottenere un modello più dettagliato e quindi più rispondente alla scala reale; è altrettanto vero che le nuvole di punti digitali che devono essere realizzate devono garantire il dettaglio solo fino alla scala richiesta nella restituzione finale, tutto il resto del dato viene acquisito in eccesso, con evidenti problematiche legate allo spazio fisico che le informazioni in surplus vanno ad occupare, solitamente in termini di decine di Gb²⁷; allo stesso tempo un dato ridondante, eccessivo, richiede maggior tempo nelle acquisizioni sul campo; deve essere allo stesso modo considerato che essendo gli strumenti laser scanner sistemi di acquisizione massiva e passiva, spesso gran parte del dato viene raccolto su oggetti che non sono direttamente necessari al fine del rilievo; nonostante che spesso il dato sia utile solo su alcune porzioni della scansione, special-



Fig. 17 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti, integrata in parte di dato RGB, della cittadella sezionata per permettere di vedere lo sviluppo interno del Museo Archeologico e le altezze del terreno circostante.

mente nel caso dei rilievi di esterni dove la rotazione di 360° che compie lo strumento interessa l'oggetto del rilievo sono in minima parte, il valore di densità deve essere mantenuto elevato ai fini della registrazione che, come vedremo più approfonditamente in seguito, oggi tende a basarsi sempre più sulla sovrapposizione dei punti acquisiti tra due scansioni consecutive; il dato di densità espresso dagli strumenti²⁸ è definito in base alla distanza dal sensore, ma l'obiettivo dell'operatore deve concentrarsi non tanto sulla definizione di un valore di definizione standard per ogni postazione, quanto al valore da conferire ad ogni stazione per conferire ai punti dell'architettura di interesse il livello di densità accettabile ai fini della scala di restituzione, per questo è direttamente in relazione con la distanza tra lo strumento e l'oggetto del rilievo. La precisione nelle misurazioni, spesso

definito come indice di qualità della scansione, consiste invece nel ripetere per più volte la misura del punto, valutando le differenze tra le varie posizioni del punto nello spazio ottenute e restituendolo con le coordinate che esprimono la media tra le varie posizioni; il valore da fornire dipende spesso dalla tipologia di strumento che abbiamo a disposizione dato che i laser scanner che di per se sono molto precisi non hanno necessità, specialmente a brevi distanze di incrementare il valore di qualità mentre per scanner meno precisi (come il Faro che abbiamo visto sulla singola misurazione può avere errori che stanno nella forbice di un centimetro), occorre incrementare il numero di misurazioni, per evitare eccessivo rumore digitale sulle superfici dell'architettura. Ovviamente, incrementando il numero di misurazioni il tempo di acquisizione cresce in maniera direttamente pro-

porzionale, non aumenta però la dimensione dei file realizzati. Il posizionamento delle stazioni e la distanza da mantenere sia con l'oggetto che tra le varie scansioni, oltre che ai fini della densità del modello e della sovrapposizione dei punti utili alla fase di registrazione, può essere valutata solo sul campo per verificare di riuscire a coprire tutti i coni d'ombra e quindi per definire al meglio il modello tridimensionale dell'oggetto da rilevare.

Le scelte da eseguire in fase di acquisizione, quindi, devono mediare vari interessi: la necessità di descrivere le superfici secondo la scala di riduzione prestabilita, di avere un database leggero, di avere una adeguata sovrapposizione, di avere una adeguata qualità, di coprire i coni d'ombra, di impiegare meno tempo possibile nelle operazioni.

Nel caso specifico del rilievo di Piombino le scelte potenzialmente dovevano essere differenti a seconda che si trattasse del rilievo delle architetture oppure del rilievo urbano, che per definizione necessita di una scala di approfondimento inferiore. Il rilievo architettonico, per cui, come abbiamo detto in precedenza, si aveva la necessità di realizzare un modello adatto alla restituzione in scala 1:50, ha imposto di mantenere una maglia di definizione sulle superfici degli edifici non inferiori ad 1cm; nonostante il rilievo urbano potesse essere ideato per essere restituito ad una scala di riduzione superiore al 1:500, che quindi avrebbe consentito di acquisire le superfici degli oggetti circostanti proporzionalmente rispetto a quella 1:50 con una maglia di punti distanti anche 10 cm tra di loro, non era questo ammissibile ai fini della corretta registrazione del rilievo: una così rada maglia di punti avrebbe causato nell'allineamento per sovrapposizione di punti un margine di incertezza troppo elevato. Per questo motivo, con l'intenzione di mantenere alta la sovrapposizione si è deciso di eseguire una scansione ogni 15 metri, mantenendo una definizione di 0,6 cm a 10 metri di distanza dal sensore, che in sostanza avrebbe garantito una distanza massima tra i punti di 0,9 cm, lungo l'asse dello spostamento

delle scansioni: una definizione di poco inferiore a quella richiesta per l'architettura, che ha consentito di realizzare al meglio la fase di registrazione ma ha causato la creazione di un database di informazioni più pesante.

Elaborazione dei dati e la messa a registro

Proprio per il fatto che, come più volte è stato ribadito, le acquisizioni laser scanner sono di natura massiva e passiva, ovvero l'operatore non può determinare, e comunque per questioni di tempistiche sul campo non conviene farlo²⁹, su cosa concentrare le misurazioni, il risultato delle misurazioni nelle singole nuvole di punti porta sempre e comunque ad avere una porzione del dato errato per causa di quello che viene chiamato "rumore digitale". Numerose ricerche hanno evidenziato come quello che si crede comunemente uno strumento di misurazione molto affidabile in realtà abbia dei grandi limiti nel riconoscere i punti utili alla descrizione delle architetture³⁰, che invece strumenti tradizionali come le stazioni totali, per mano dell'operatore, riescono facilmente a conseguire: in particolare è stato evidenziato come negli spigoli lo strumento vada in crisi, non riuscendo a definire se il punto da misurare dallo strumento sia lo spigolo, o il punto che è proiettato dal sensore oltre lo spigolo, portando a trovare molti punti in realtà inesistenti; nel caso in cui si trovi in situazioni con oggetti che presentano un grande numero di facce, si pensi ad esempio ad un cespuglio, dove ogni foglia ha numerosi spigoli, si capisce come il risultato delle acquisizioni sia erroneo; limitandoci a questi esempi di casi errati, nonostante sia da tener presente che il dato laser soffre l'acquisizione di tutte quelle superfici riflettenti, che possono modificare la direzione del raggio luminoso (specchi, vetri, marmi lucidi...)³¹ è necessario, una volta acquisito il dato, sottoporlo ad un preventivo filtraggio, in modo tale da evitare tramite un calcolo automatizzato di trovare eccessivi punti di rumore nelle scansioni definitive; deve essere considerato che i punti eliminati in questo modo potrebbero inoltre determinare errori in fase di reg-

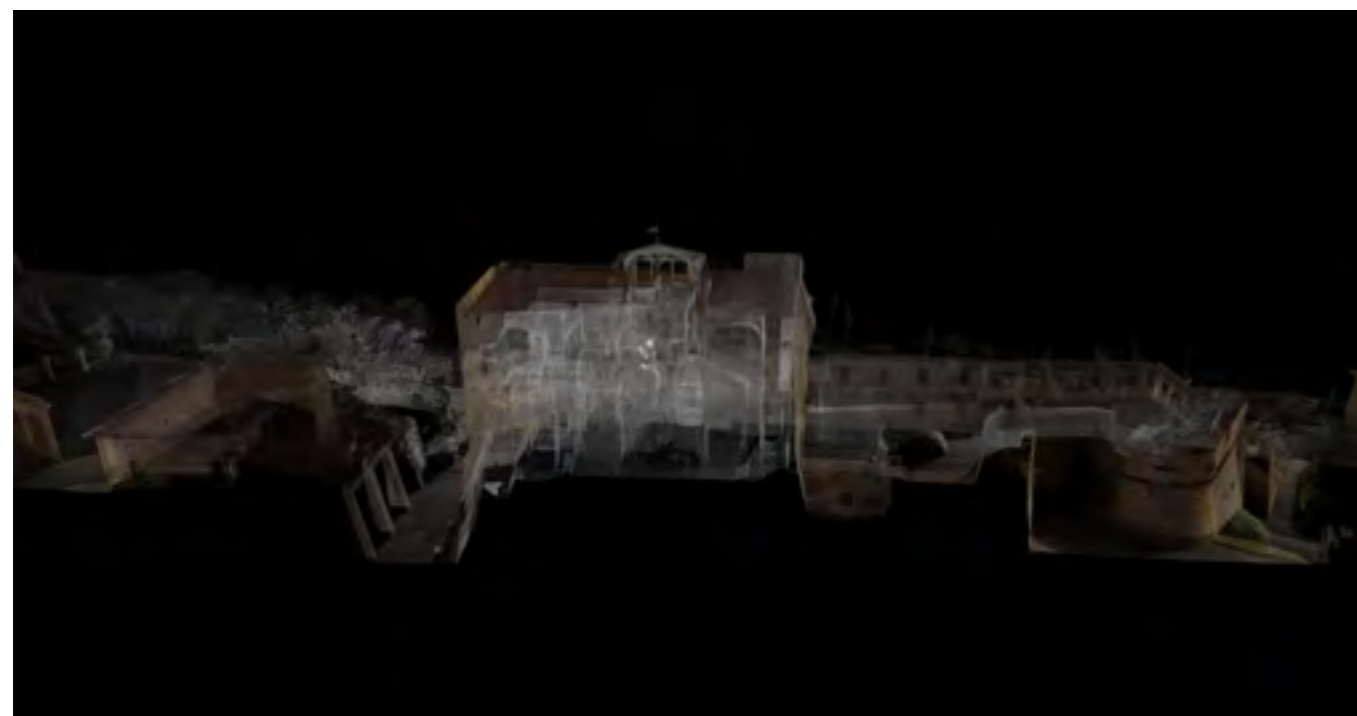


Fig. 18 Vista in proiezione prospettica della nuvola di punti, integrata in parte di dato RGB, del castello sezionato per permettere di vedere lo sviluppo interno del Museo e la relazione con le architetture della fortezza medicea circostante

istrazione qualora fosse stato progettato di allineare le acquisizioni in base alla sola sovrapposizione del dato laser.

In base a quanto specificato, tutte le scansioni sono state adeguatamente filtrate all'interno delle piattaforme di gestione del dato legate ad ogni strumento; successivamente è stato scelto di utilizzare come software per la registrazione e l'utilizzo delle nuvole di punti *Cyclone*³². Una volta estratto il dato dal filtraggio, è stato creato un unico database nel quale archiviare le scansioni effettuate, infine sono iniziate le fasi di registrazione, ovvero di allineamento delle postazioni laser scanner.

Per quanto concerne la fase di registrazione delle scansioni di un rilievo, è evidente come la sua buona riuscita sia *in primis* legata alla corretta esecuzione delle precedenti fasi di progettazione ed acquisizione del dato, ovvero è impensabile estrarre dal processo

di registro un modello corretto se le scansioni non sono state pensate con criterio. Nel corso degli anni gli strumenti si sono molto modificati, ed ultimamente proprio per migliorare lo svolgimento e le tempistiche legate alla fase di messa a registro; fin dai primi utilizzi di questi sistemi di misurazione infatti, (è possibile risalire fino all'utilizzo degli strumenti a testa fissa) le varie acquisizioni, necessarie ad eliminare i coni d'ombra dagli oggetti di interesse, venivano allineate tramite l'utilizzo in campo di punti notevoli (*target*) che i software riuscivano a riconoscere automaticamente; spesso nel caso di rilievi di grandi dimensioni era consuetudine accompagnare, o meglio integrare, le scansioni con un rilievo di supporto di cui fosse possibile calcolare l'errore³³, tramite la realizzazione di poligoni chiusi: calcolando l'errore del rilievo effettuato con l'utilizzo della stazione totale era possibile in tal modo far rientrare l'errore comp-

lessivo del rilievo laser scanner entro tali parametri, ovviamente se l'errore sui target fosse stato allo stesso tempo di poco conto. In questa metodologia il limite era considerare durante l'allineamento le scansioni mano a mano registrate come un blocco rigido, senza la possibilità di mediane gli errori una volta conclusa la registrazione. L'utilizzo inoltre di sistemi topografici a fianco del rilievo laser scanner ha spesso comportato un aumento significativo del tempo di lavoro *in situ* e del numero di personale da dedicare alle campagne di acquisizione. Per questi motivi, negli ultimi anni la ricerca ha tentato di fornire un sistema alternativo per la registrazione e la valutazione dell'affidabilità del rilievo, cercando di utilizzare gli strumenti laser scanner in maniera il più simile possibile agli strumenti topografici, o almeno impostando il progetto di rilievo sulla base di principi legati al mondo della topografia, primo su tutti quello di poligoni³⁴; questi metodi di progetto del rilievo si sono confermati affidabili grazie al processo di collaudo degli allineamenti di cui si tratterà in seguito; la possibilità di utilizzare le scansioni in maniera analoga alla stazione totale, rilevando in maniera molto dettagliata solo alcuni punti dell'ambiente che combaciano con i target utili all'allineamento di una poligonale di scansioni chiusa, è stato possibile anche grazie all'evoluzione degli strumenti, che dall'avvento dei sistemi di misurazione a differenza di fase, piuttosto che a tempo di volo, hanno permesso di eseguire le scansioni in tempi molto più rapidi, arrivando a misurare fino a un milione di punti al secondo³⁵, 20 volte maggiori rispetto dei coevi strumenti a tempo di volo. Questa innovazione ha determinato non solo una maggiore rapidità di acquisizione ma anche una maggiore quantità di scansioni effettuate per la realizzazione di un rilievo: se in precedenza la realizzazione di poche scansioni in più avrebbero comportato ore di rilievo sul campo, facendo sì che l'attenzione fosse focalizzata a realizzare database con meno scansioni possibili, in questo modo la rapidità di acquisizione, faceva sì che l'attenzione si spostasse su altri fattori;

il gran numero di scansioni effettuate e il gran numero di punti acquisiti hanno comportato una forte evoluzione dei *software*, che si sono concentrati sullo sviluppo di un sistema che consentisse la registrazione del dato per sovrapposizione di punti, senza il bisogno dell'utilizzo di target: perchè utilizzare solo tre punti per legare le scansioni quando già in due scansioni contigue esistono migliaia, se non milioni, di punti omologhi?

Da questa intuizione i programmi di gestione delle nuvole di punti si sono molto evoluti, consentendo di allineare le scansioni per sovrapposizione, cosa che ha comportato da un lato la dismissione dell'utilizzo di target, ma dall'altro una attenzione particolare non tanto sul posizionamento delle stazioni quanto sulla distanza tra due scansioni contigue in relazione alla densità delle scansioni stesse, del numero di punti presente nella scena; senza addentrarsi troppo in tecnicismi sui sistemi di registrazione tramite l'utilizzo di *cloud constraint*³⁶, è senza dubbio necessario affermare che, nonostante questo sia un sistema di grande innovazione, non può essere applicato in ogni caso (ad esempio quando l'oggetto del rilievo è contornato da una grande presenza di vegetazione, che comporta l'acquisizione di molto dato incerto, il verde appunto), necessitando in tali situazione l'utilizzo dei target e talvolta di altri rilievi di appoggio³⁷. Detto questo è innegabile che l'allineamento visuale (*visual alignemnt*) e l'auto allineamento delle scansioni in seguito ad una congrua fase di progettazione del rilievo abbiano ridotto drasticamente i tempi dedicati alla registrazione delle singole scansioni.

Ma la maggiore innovazione sta nella sostanziale modifica degli strumenti di registrazione³⁸, o meglio della concezione delle scansioni all'interno della fase di registrazione: mentre in precedenza ogni scansione poteva essere allineata ad un numero limitato di scansioni in un unico pannello di registrazione, facendo sì che venissero realizzati numerosi blocchi rigidi, e che quindi non fosse possibile controllare l'errore complessivo, adesso il software permette la gestione



Fig. 19 Vista in proiezione prospettica del modello tridimensionale mappato fotograficamente della torre della Porta di Terra, attraverso ricostruzione S.f.M.; i rettangoli proiettati attorno al modello rappresentano le fotografie allineate per costruire il modello.

della registrazione in maniera molto più fluida, non limitando il numero di scansioni all'interno di una registrazione e consentendo per gruppi gradualmente di allineare le singole scansioni, in modo tale da realizzare il modello definitivo; un metodo in cui più che la realizzazione del gruppo unico, è possibile legare una scansione a tutte quelle che condividono con essa un numero adeguato di punti e che quindi porta alla mediazione degli errori angolari, permettendo in fase di registrazione di realizzare circuiti chiusi su cui mediare l'errore proprio come nel rilievo topografico. Secondo questi principi è stato registrato il rilievo di Piombino, dove per ogni edificio è stato realizzato

un modello singolo, che poi è stato riunito alla poligonale di scansioni chiusa che ricrea le mura della città: l'affidabilità di questo metodo è direttamente visibile durante la chiusura della poligonale, quando il software riesce a computare l'errore da distribuire sui vertici della poligonale, che in questo caso è stato minimo, al di sotto del centimetro, sia sul piano xy che in elevazione.

La certificazione del rilievo

Quando si tratta di affidabilità del rilievo digitale è necessario distinguere tra l'accuratezza strumentale e quella del modello definitivo che riunisce tutte le postazioni di ripresa; mentre l'accuratezza strumen-

tale è definita da parametri statistici provenienti da accurati test in laboratorio, ed è quindi da ritenere attendibile su ogni singola scansione, è sicuramente improprio basare sugli stessi dati numerici che caratterizzano la singola ripresa con il modello generale registrato.

La verifica delle registrazioni non può nemmeno essere basata sui dati che provengono dal pannello di registrazione dei software: essi infatti definiscono per ogni cloud constraint utilizzato un errore di allineamento³⁹ ma questo non è un dato utilizzabile in quanto è derivato dalla media degli spostamenti di tutti in punti che compongono la singola scansione, computando in questo modo anche gli eventuali punti di rumore digitale o le superfici sottili che possono erroneamente essere assimilate⁴⁰.

Non esistono protocolli normativi⁴¹ per valutare la qualità delle registrazioni delle nuvole di punti, motivo per cui da diversi anni la ricerca del laboratorio di rilievo si incentra sulla definizione di metodologie opportune per il collaudo e la verifica della correttezza e dell'affidabilità del modello registrato⁴².

La soluzione ad ora adottata per quantificare il valore di errore nella registrazione delle scansioni si basa sulla verifica della distanza tra i fili di sezione, ciascuno appartenente ad una differente postazione laser scanner: ogni scansione misura e restituisce una rete di punti per ogni superficie dalla sua postazione visibile, durante il processo di registrazione una superficie misurata da due scansioni differenti viene ad essere costituita da due nuvole di punti allineate secondo uno stesso sistema di riferimento; l'operatore può andare ad indagare nel dettaglio se i punti appartenenti a due scansioni differenti realmente vanno a creare una unica superficie oppure se le due sono eccessivamente distanti, mostrando due differenti profili nello spazio. Per eseguire tale verifica il modello di punti tridimensionale viene tagliato da piani verticali ed orizzontali in punti differenti in modo da andare ad indagare i punti notevoli in cui è ritenuto più probabile che si veda un disallineamento: mag-

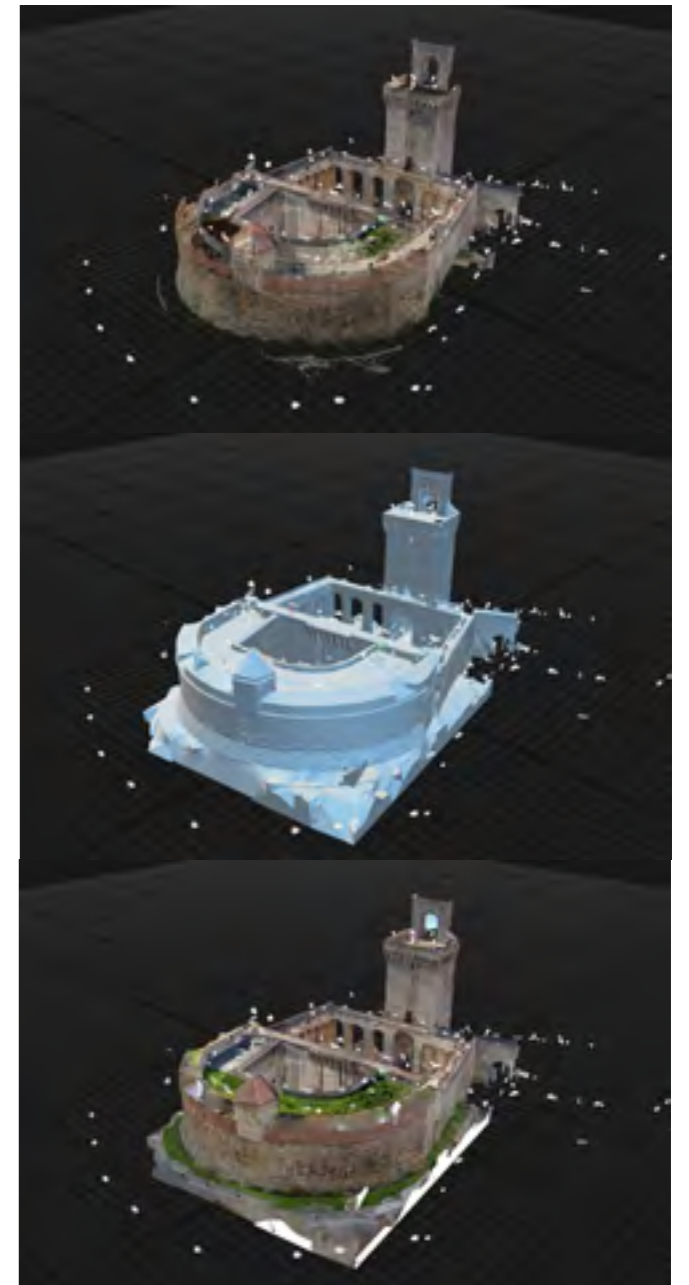


Fig. 20 Viste delle varie fasi di ricostruzione del modello fotografico. Dall'alto: allineamento dei fotogrammi e realizzazione di una nuvola di punti con dato RGB; modello mesh ottenuto triangolarizzando i punti della nuvola; modello mesh con texture applicata proiettando il colore dai punti di scatto dei fotogrammi sul modello.



Fig. 21 Vista in proiezione prospettica del modello tridimensionale mappato fotograficamente del Castello di Piombino: si vede la cortina muraria del circuito medievale che si andava ad innestare al Cassero Pisano, prima che le sue dimensioni venissero modificate e racchiuse all'interno della fortezza

giori attenzioni sono dedicate agli spigoli, alle modanature ecc. L'importanza di verificare i fili di sezione sia in pianta che in alzato deriva dal fatto che è probabile, specialmente nel caso di edifici molto alti, che un piccolo errore angolare azimutale non sia visibile al piano terreno tagliando con un piano orizzontale, causando il rischio di non vedere possibili errori nelle parti alte dell'edificio⁴³.

La distanza tra i fili di sezione dei modelli viene a questo punto misurata e laddove si verifici che questo valore sia maggiore della soglia di tolleranza ammessa dalla scala di definizione del rilievo significa che la registrazione non è adeguatamente affidabile e

deve essere migliorata. Nel caso del rilievo di Piombino, avendo scelto la scala di rappresentazione 1:50, il disallineamento non ha superato il valore di 1 cm. Per assicurare una registrazione affidabile è necessario verificare ogni singola operazione di rototraslazione, ovvero ogni singolo *cloud-constraint* realizzato: solo procedendo con attenzione alla verifica delle sezioni è possibile garantire un modello finale che rientri nelle tolleranze della scala di restituzione.

6.3.2 rilievo S.f.M.

Il rilievo fotografico delle architetture che caratterizzano il sistema difensivo della città di Piombino è stato



Fig. 22 Vista in proiezione prospettica del modello tridimensionale mappato fotograficamente del Castello di Piombino: si può apprezzare l'elevata qualità della texture che permette facilmente di riconoscere le tessiture murarie dei fronti del Cassero, in modo tale da facilitare le operazioni di indagine archeologica.

pensato per supportare le misurazioni del rilievo laser scanner, fornendo i dati materici delle superfici, che non potevano limitarsi alle fotografie eseguite dalla camera integrata dello strumento, utili a fornire una gradevole visualizzazione delle scansioni ma non a realizzare un elaborato architettonico scientifico che descriva la texture delle superfici.

Per integrare questa mancanza di dato è stato scelto di utilizzare i moderni sistemi di fotomodellazione tridimensionale⁴⁴ per ricostruire partendo da semplici fotografie modelli 3d texturizzati delle architetture; questi modelli, che provengono a loro volta dalla elaborazione di nuvole di punti ottenute mediante

un allineamento tramite procedure Structure from Motion⁴⁵(S.f.M.), sono semanticamente differenti, seppur simili, alle scansioni del laser scanner. La differenza sostanziale tra i modelli realizzati dalle due differenti metodologie di acquisizione, come è ormai ben noto⁴⁶, consiste nella facilità di trovare errori morfologici nelle ricostruzioni dovuti ai difetti che l'apparecchio fotografico può riscontrare nell'imprimere i pixel nel sensore, derivanti dal sistema di acquisizione passivo⁴⁷, che subisce le caratteristiche della luce, non consentendo a priori di determinare in laboratorio l'affidabilità di questo sistema di rilevamento.

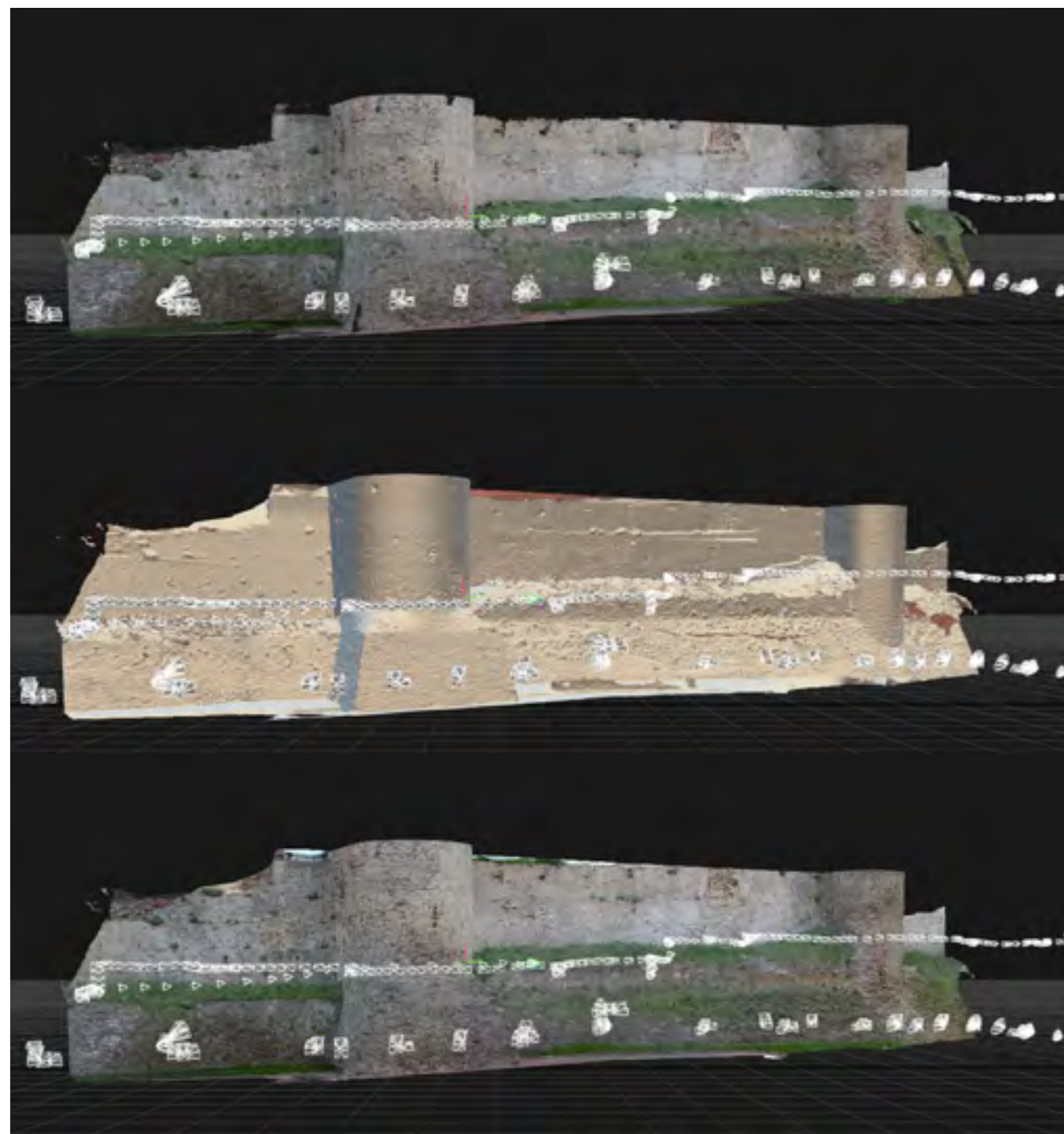


Fig. 23 Viste delle varie fasi di ricostruzione del modello fotografico delle mura della cittadella. Dall'alto: allineamento dei fotogrammi e realizzazione di una nuvola di punti con dato RGB; modello mesh ottenuto triangolarizzando i punti della nuvola; modello mesh con texture applicata proiettando il colore dai punti di scatto dei fotogrammi sul modello.

Generalmente il dato morfologicamente incerto dei modelli ha previsto ai fini di un rilievo affidabile di affiancare alle ricostruzioni fotografiche ulteriori strumenti a supporto delle misurazioni, che possono variare da nuvole di punti topografiche a nuvole di punti laser scanner⁴⁸.

Fina dalle loro prime applicazioni il forte limite di utilizzo di questi sistemi di rilevamento era attribuibile alle smisurate necessità in termini di hardware e di tempi di calcolo per elaborare modelli complessi; negli ultimi anni lo sviluppo delle componenti grafiche dei computer e la possibilità di collegare diverse *workstation* in serie per facilitare i calcoli delle ricostruzioni hanno consentito di effettuare modelli a partire da *dataset* fotografici di dimensioni sempre maggiori; l'evoluzione dei software stessi ha visto uscire sul mercato recentemente applicativi che riescono tranquillamente a gestire *dataset* fotografici che superano 1000 fotografie⁴⁹. Le nuvole non strutturate, ottenute dall'allineamento dei fotogrammi, sono blocchi rigidi di punti, su cui una volta elaborate non è possibile mediare gli errori; per questi motivi spesso è utile accompagnare le fasi di acquisizione dei dati con l'utilizzo di target di appoggio su cui fissare il rilievo.

Una ulteriore sostanziale differenza rispetto ai sistemi di acquisizione laser scanner consiste nella misura del rilievo: mentre in questi ultimi siamo certi che il dato acquisito viene registrato nel database in metri, la fotomodellazione riesce a restituire un modello scalato in pixel, che non corrisponde ad una reale misura metrica. Per questo motivo sorge la necessità sempre in ambito architettonico di accompagnare il rilievo con la camera fotografica con altri sistemi di misurazione.

La ricostruzione tridimensionale prevede allo stesso modo del rilievo laser scanner di performare un collaudato *iter* metodologico per ottenere un prodotto finale metricamente affidabile; similmente sarà quindi necessario di approfondire le fasi di acquisizione e gestione ed elaborazione del dato fotografico.

Fase di progettazione e acquisizione

La fase di progettazione delle acquisizioni fotografiche ha dovuto prevedere tutte le possibili problematiche legate alla ripresa fotografica in modo tale da scongiurare eventuali problemi durante le campagne di acquisizione, in modo finalizzato da scegliere gli strumenti adatti a completare i rilievi; poiché nel caso delle strutture fortificate di Piombino la maggior parte delle superfici da documentare sono esterne, e quindi non necessitano di particolari accorgimenti per evitare scarsa illuminazione, è stato ben più semplice programmare le acquisizioni; allo stesso modo essendo possibile quasi per tutte le porzioni degli edifici ruotarvi attorno da una posizione piuttosto ravvicinata, non è stato necessario prevedere l'utilizzo di teleobiettivi, oppure ricercare distanti posizioni di scatto per riprendere le superfici nascoste; solamente in alcune situazioni, l'eccessiva vicinanza alle mura, come ad esempio all'interno di quello che doveva essere il fossato attorno alla cittadella, ha creato alcune zone d'ombra che sono state integrate mediante il volo di un drone. Detto questo è stato possibile ottenere buoni modelli fotografici mediante l'utilizzo di comuni camere fotografiche semiprofessionali⁵⁰.

La programmazione delle acquisizioni, oltre che a cercare di ottenere fotogrammi ben bilanciati, utili al rilievo, (ovvero con una scena uniformemente a fuoco, con una buona profondità di campo, con una esposizione corretta, con un corretto bilanciamento dei bianchi etc. in sostanza una buona fotografia)⁵¹ e a realizzare acquisizioni tra loro adatte a ricreare la superficie tridimensionale degli oggetti (con la adeguata sovrapposizione tra i fotogrammi e con la necessaria copertura delle superfici per evitare coni d'ombra)⁵² si è concentrata sulla definizione della densità di informazioni utili a rappresentare correttamente gli edifici nella loro tridimensionalità, allo stesso modo di quanto detto in precedenza per le scansioni laser scanner. Una fotografia infatti agli occhi del rilevatore deve apparire come uno strumento di misura, come un metro, mentre i pixel che la com-

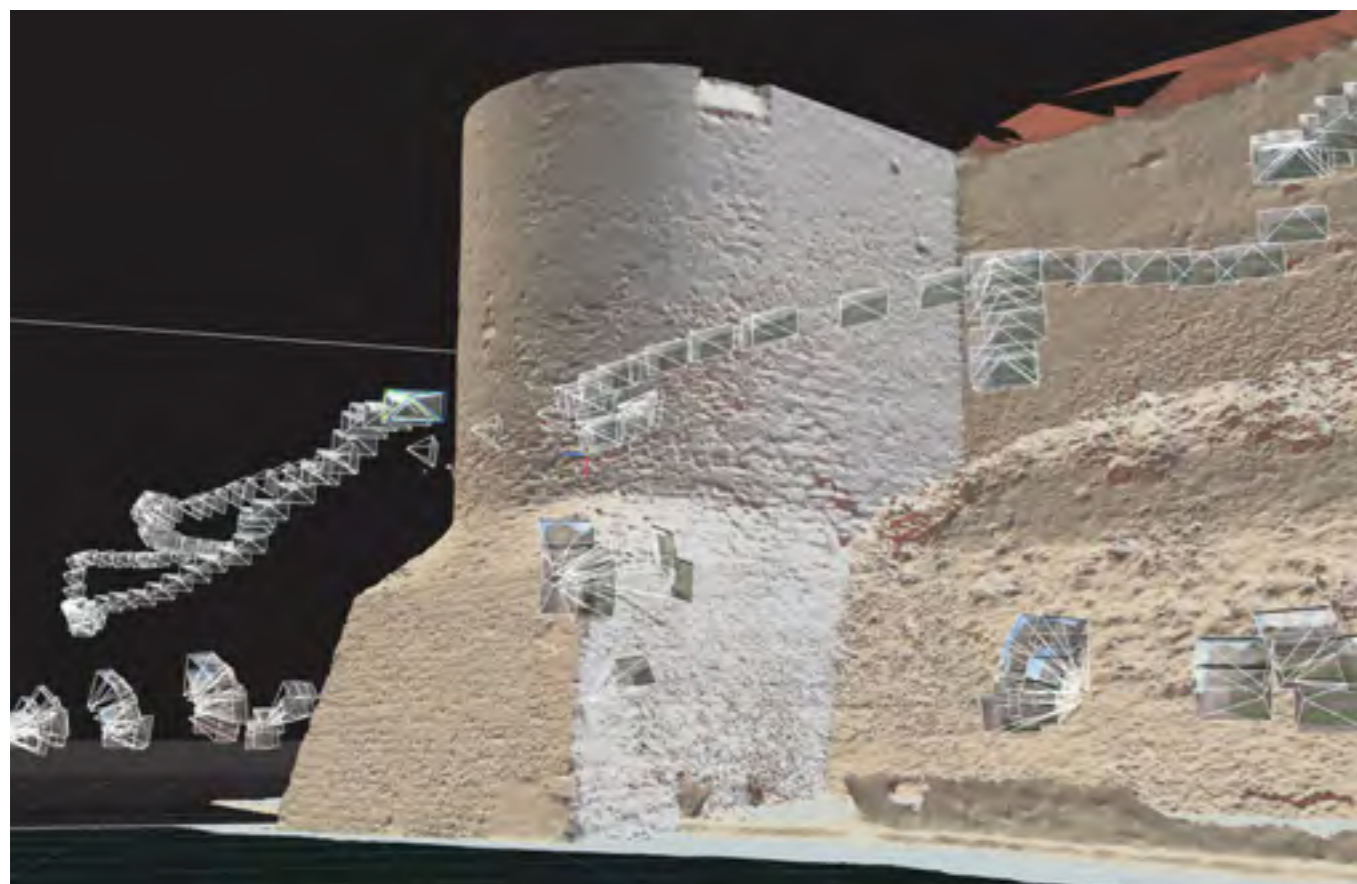


Fig. 24 Dettaglio della superficie mesh di una torre della cittadella: l'unione di fotogrammi acquisiti da terra con scatti ripresi da drone hanno migliorato la qualità del modello finale eliminando tutte quelle zone d'ombra che avrebbero ricostruito un modello forato o geometricamente errato

pongono sono il dettaglio che la misurazione riesce ad ottenere, come le tacche del metro che rappresentano i centimetri. Le superfici delle architetture da ricostruire tridimensionalmente dunque saranno definite da una certa quantità di pixel, e a seconda della densità di pixel che si può trovare sull'edificio può essere definita la scala di questo modello; a monte è stata indicata necessaria per la rappresentazione delle fortificazioni di Piombino la scala di dettaglio 1:50, questa abbiamo visto porta nel rilievo laser scanner a eseguire scansioni che misurino gli edifici con almeno un punto ogni centimetro; per quanto riguarda invece il modello fotografico è stato sperimentato

che per mantenere la corretta scala di rappresentazione occorre in fase di acquisizione di eseguire scatti che mantengano la proporzione base di 6 pixel ogni centimetro di architettura inquadrata⁵³. In questo modo sono state realizzate tutte le acquisizioni delle architetture di Piombino, dividendo i modelli in base all'edificio e a sua volta dividendo l'edificio in facciate per semplificare il calcolo ai fini della rappresentazione dei prospetti.

Elaborazione dei dati

Prima di procedere con l'elaborazione dei dati nei software dedicati alla ricostruzione della scena tridimensionale, è stato fatto un attento controllo quali-



Fig. 25 Dettaglio della superficie mesh con texture applicata di una torre della cittadella: grazie alla realizzazione di un modello geometricamente corretto, come visto nella figura precedente, allo stesso modo la texture delle murature è stata ricostruita in maniera affidabile

tativo sui fotogrammi: nonostante si fosse cercato di rientrare sempre nei tempi di sicurezza per evitare l'effetto micro-mosso negli scatti fotografici⁵⁴, facilitati dal fatto che le architetture fossero per lo più esterne, quindi adeguatamente illuminate e senza la necessità di rallentare eccessivamente i tempi di scatto delle fotocamere, era necessario controllare la qualità dei singoli scatti. Per questo motivo i fotogrammi, sempre eseguiti in formato .raw in modo tale da garantire l'editing in post-produzione, sono stati importati in un software apposito⁵⁵ con il fine verificarne la corretta messa a fuoco e di regolarne i parametri. In questo modo è stato equalizzato il bilanciamento dei

bianchi per tutti gli scatti così da avere un dato colore il più possibile uniforme⁵⁶. A causa delle differenti esposizioni alla luce delle superfici si è deciso inoltre di limitare la presenza di zone sovrailluminate ed in ombra, riducendo al minimo i parametri di Highlights e Shadow. Infine si è cercato di rendere l'esposizione delle superfici il più omogenea possibile variando il parametro a seconda del tempo di scatto del fotogramma⁵⁷. Una volta verificati tutti i file sono stati salvati in formato immagine (.tif) con una compressione che non facesse perdere la qualità originale (.lzw)⁵⁸.

I dataset ottenuti avevano dimensioni molto elevate, motivo per cui si è deciso di sperimentare l'utilizzo

di differenti software di ricostruzione dei dati in modo da stabilire quale fosse il più opportuno per un tale ammasso di informazioni; il gruppo di ricerca da anni utilizza i software SfM per la ricostruzione di scene tridimensionali⁵⁹ utili alla documentazione e all'estrazioni di texture rettificate, e consapevoli dei vantaggi e dei limiti dei software fino ad allora sperimentati⁶⁰. I programmi, in continua evoluzione, riescono a fornire oggi modelli sempre più affidabili: l'affidabilità varia a seconda della risoluzione del fotogramma, ovvero della scala del rilievo, riuscendo a raggiungere per la scala 1:50 i due cm⁶¹; purtroppo la gestione di dati di tali dimensioni avrebbe richiesto di utilizzare macchine di calcolo eccessivamente prestanti, non in possesso del laboratorio⁶².

I recenti sviluppi di altri software di gestione del dato fotogrammetrico hanno spinto piuttosto verso la sperimentazione di nuovi applicativi in grado di gestire più rapidamente il dato fotografico⁶³.

Il workflow di funzionamento di questi software segue sostanzialmente quello degli altri programmi che computano l'allineamento dei fotogrammi mediante gli algoritmi SfM: è diviso in processi, durante il primo vengono disposti i punti di acquisizione dei fotogrammi nello spazio (vero e proprio processo SfM), nel secondo si densifica il dato delle nuvole di punti e contemporaneamente si procede alla realizzazione di una superficie mesh in base alla triangolazione di punti, infine il modello ottenuto viene texturizzato⁶⁴.

Le fotografie sono state sottoposte al controllo qualitativo del software in modo da individuare i fotogrammi potenzialmente pericolosi ai fini della qualità dell'allineamento, successivamente a questa fase sono stati verificati gli errori di posizionamento delle camere eliminando le poche mal disposte. Dopo aver densificato il dato, sulla base di alcuni punti di controllo⁶⁵ è stato scalata la nuvola di punti tridimensionale ottenendo un errore inferiore alle tolleranze, causato in parte nell'azione umana della scelta dei punti omologhi.

Per verificare la qualità della *mesh* è stata estratte ed

importata in un *software* dedicato alla gestione dei processi di *reverse engineering*⁶⁶ (Geomagic Wrap 2017), per testare la qualità della triangolazione dei punti. Il modello ottenuto già ad occhio nudo presentava una regolare disposizione dei triangoli della superficie, indice di buona qualità, cosa che è stata verificata dal software: attivando un algoritmo per il riconoscimento automatico delle imperfezioni delle superfici (punte, fori, ecc.) si è visto come la ricostruzione tridimensionale abbia realizzato un modello sostanzialmente privo degli errori di ricostruzione classici, eccezion fatta per quelle aree che a causa di una scarsa visibilità, quindi a causa di una esecuzione degli scatti manchevole del dato necessario ad una accurata ricostruzione tridimensionale, non sono state modellate correttamente nella *mesh*.

Verificata la qualità della *mesh* è stato successivamente necessario applicare la texture al modello in modo tale da esportare ortorendimenti ad alta definizione delle superfici.

6.3.3 RILIEVO INTEGRATO

Il rilievo fotografico delle superfici delle architetture di Piombino, come accennato in precedenza, ha presentato alcuni problemi operativi dovuti alla matericità delle superfici esterne; per evitare la ricostruzione di un modello 3D incompleto, che avrebbe provocato la restituzione di una texture erronea, condizionando negativamente la buona riuscita dei fotogrammi, si è deciso di integrare il dato laser scanner con quello fotografico.

Il problema della irregolarità delle superfici ricreate dal dato fotografico è apparso fin dalle prime applicazioni software (nota: nelle prime versioni dei programmi la realizzazione della mesh da nuvola di punti era molto più inaccurata e presentava diversi errori; per risolvere tali problemi si utilizzavano a supporto programmi di gestione delle mesh [quali geomagic studio 2012 cit. Fantini Masada]; nonostante oggi i software abbiano migliorato gli strumenti di gestione delle mesh non può essere risolto il prob-

lema dovuto al riconoscimento cromatico dei punti [nonostante le foto possano essere allineate tramite l'utilizzo di appositi target le superfici ricreate saranno comunque rumorose]. Quando il dato fotografico era accompagnato da un rilievo tridimensionale laser scanner, e le geometrie dell'oggetto erano semplici, in modo da avere scansioni che riuscissero a riprendere la quasi totalità delle superfici con minimi coni d'ombra, era una procedura comune utilizzare il dato della nuvola di punti laser scanner per realizzare la mesh e successivamente applicare la texture ottenuta dall'allineamento dei punti di scatto.

Oggi è possibile, grazie allo sviluppo di alcuni software, allineare insieme le fotografie ottenute da procedure S.f.M. con le scansioni laser scanner: il software considera la panoramica di px ottenuti dallo scanner come una immagine cubica, ovvero sei immagini, riconducendo quindi la posizione della scansione al punto di scatto di sei fotografie; queste possono essere unite automaticamente, oppure tramite l'individuazione di punti omologhi all'allineamento delle fotografie. A seconda del software utilizzato poi durante la realizzazione della mesh viene tenuto in considerazione con priorità di affidabilità il dato proveniente dalle nuvole di punti del laser scanner, andando ad utilizzare i punti tridimensionali ricostruiti nello spazio dalle fotografie per completare i coni d'ombra delle scansioni.

Il modello ottenuto in questo modo riesce ad evitare l'irregolarità e l'errore morfologico dovuto alle superfici ostili alla ricostruzione S.f.M. e permette di ottenere una texture morfologicamente affidabile con il vantaggio ulteriore di non necessitare alcuna misura aggiuntiva per la messa in scala del modello: questo infatti grazie all'utilizzo del dato laser è già scalato in metri sulla base del sistema di riferimento in coordinate polari delle scansioni.

Note

1 sulle problematiche riguardanti la definizione di rilievo, è emblematico il caso della lingua inglese, in cui per “survey” si intende una qualsiasi azione di raccolta di dati (foto, dimensioni, preferenze politiche, opinioni...)

2 vedi Pedretti 2008

3 per una approccio al percorso di conoscenza di un fabbricato, così come suggeriscono le NTC dal 2008, vedi Minutoli 2017, Van Riel 2012

4 Viganò [2008] rappresenta in questo una eccezione, che ha comunque dimostrato quante informazioni può fornire il rilievo ai fini della conoscenza della storia dei fabbricati

5 il primo tentativo di allineamento dei disegni leonardiani è visibile nelle tavole restituite da Fara 1999

6 furono comunque utilizzati gli strumenti a disposizione del Laboratorio di Rilievo dell'Università di Firenze del Dipartimento di Architettura.

7 per approfondire confronta Rinaudo 2017

8 Bianchi, Zampilli 2001

9 per un approfondimento del contributo delle indagini stratigrafiche per la conoscenza della storia e l'evoluzione del fabbricato vedi Arrighetti 2017

10 uno dei primi progetti di utilizzo dello strumento laser scanner all'interno del Dipartimento è stato svolto su Battistero del Duomo di Pisa, vedi Pancani 2016

11 De Luca 2011

12 Cipriani Fantini 2015

13 Bianchi 2007

14 sotto la competenza della Parchi val di Cornia

15 allo stesso modo della cittadella anche il castello viene gestito dalla Parchi Val di Cornia

16 lo stesso che era stato potenziato dal Camerini come da disegno alla Figura 30 del capitolo 5

17 Ad ogni workshop hanno partecipato circa 20 studenti del corso di Architettura del prof. Stefano Bertocci

18 tutti gli strumenti utilizzati per la ricerca sono di proprietà del Laboratorio di Rilievo dell'Architettura del Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze

19 controllando le schede tecniche delle strumentazioni elencate è possibile vedere come divergano le precisioni e le gittate dei tre strumenti a seconda della tipologia di utilizzo all'interno del rilievo di Piombino: si va dalla precisione millimetrica del 5010x, con 180m di portata, alla precisione +-0,3cm del 5006h, con 78m di portata, a +-0,5cm del M70 con 70 metri di portata; (gli errori sono relativi ad un punto misurato a 25 metri dal sensore)

20 il dato RGB proveniente da laser scanner non può essere considerato texture, dato che non si riesce a descrivere uniformemente la superficie delle architetture

21 Pancani in Bertocci et al 2015

22 vedi ad esempio il rilievo di Poppi in Pancani 2017

23 per un progetto di rilievo laser scanner con utilizzo di vari strumenti di misurazione di appoggio vedi Bertocci, Bigongiari, Ricciarini 2019

24 Bertocci et al. 2014 sul progetto di documentazione della Pieve di Romena

25 i dati provengono dalle schede tecniche strumentali prodotte dalla azienda Faro

26 come abbiamo visto in precedenza lo stesso Leonardo da Vinci nel codice II di Madrid ammette la complessità di completare l'ispezione e il rilievo della fortificazione

27 la realizzazione di database di grandi dimensioni porta al problema di conservare il dato digitale

28 per convenzione viene definita la distanza tra due punti all'interno della maglia che sarebbe acquisita su un oggetto posizionato alla distanza di 10 metri dal sensore.

29 è possibile definire le porzioni di architettura da non misurare, o meglio è possibile chiedere allo strumento di non misurare tutta la panoramica a 360°, ma di limitare le acquisizioni ad uno specificato range angolare, sia lungo il piano H (orizzontale) che lungo il piano V (verticale).

30 vedi Rinaudo 2017 sul problema di rilevamento degli angoli

31 vedi Pancani, Bigongiari 2018 per una analisi dei difetti di rilevamento di alcuni materiali

32 il Laboratorio di Rilievo dell'architettura ha a disposizione una licenza Educational del software

33 mentre nelle scansioni del rilievo laser era possibile calcolare un errore locale di deviazione tra il posizionamento dei singoli target in scansioni contigue, non era invece possibile valutare l'errore che si andava sommando all'interno del rilievo con il rischio di ottenere ampie deviazioni angolari.

34 per una evoluzione del metodo di acquisizione confronta con Bertocci et al. 2014 e Bertocci et al. 2015

35 valore che soltanto molto recentemente (2019) è stato superato da alcuni strumenti come il Leica RTC360

36 in parte sono stati analizzati in Bigongiari 2017

37 per una trattazione vedi Bertocci et al 2019

38 mi riferisco in questo caso specificatamente alle risorse del modulo register di Leica Cyclone, altri software stanno progressivamente raggiungendo gli standard di questo, ma per ora rimane il più affidabile e tecnologicamente avanzato.

39 solitamente compreso tra i 4 e i 20mm quando la registrazione è andata a buon fine, a seconda delle condizioni a contorno della scena da rilevare: interno, esterno, presenza

di rumore, vegetazione...

40 il caso dell'erba e della vegetazione è esemplare

41 recentemente la Leica ha iniziato a generare insieme alla registrazione delle nuvole un report pdf dei valori di allineamento, che comunque non è sufficiente a valutare la correttezza della registrazione finale.

42 Pancani 2017, Bertocci et al 2015

43 nei primi collaudi quando ancora era uso utilizzare i target a centro di massa il problema derivava dal fatto che i target erano disposti tutti ad una altezza non superiore a 2 metri, controllando bene il disallineamento sul piano orizzontale, non quello verticale.

44 De Luca 2011

45 nota...

46 Fantini in Gaiani 2015

47 il sensore riceve un segnale luminoso senza emettere luce propria come lo scanner

48 Fantini in Gaiani 2015

49 in realtà il problema non è direttamente proporzionale al numero di fotografie, quanto semmai al numero di pixel che sono in esse presenti; a seconda della superficie di pixel che ogni fotografia possiede il numero di scatti supportabile dai programmi può essere differente.

50 le acquisizioni fotografiche sono state effettuate dagli studenti del workshop come esercitazione per cui sono state utilizzate camere fotografiche differenti per ciascuna architettura

51 per una approfondita trattazione degli scatti fotografici vedi Pancani, Bigongiari 2018

52 ibidem

53 Pancani 2017b

54 Forti 2006

55 nel caso specifico si è utilizzato il plugin camera raw del pacchetto Adobe photoshop

56 il dato colore poteva però essere migliorato cercando di garantire con adeguati strumenti il bilanciamento più corretto come si può vedere in Gaiani 2015

57 (le fotografie erano state scattate in priorità di diaframma, lasciando libero di variare il tempo di scatto, a seconda della esposizione ritenuta più corretta dal sensore, misurata su un singolo punto al centro della fotografia

58 questo workflow è lo stesso consigliato dalle guide dei principali software di fotogrammetria

59 vedi Bertocci et al 2015b

60 (la maggior parte delle volte Agisoft Photoscan pro)

61 fantini 2015

62 (la guida del programma Photoscan prevede che per ogni megapixel si debba prevedere l'utilizzo di una certa quantità di ram da parte del computer).

63 vedi Pancani, Bigongiari 2018 per zephir e brolo per reality capture

64 Questo processo, che descrive rapidamente i passaggi da adottare in Reality Capture, richiede un minore utilizzo della memoria RAM, perchè il programma invece che memorizzare una unica grande maglia di triangoli per realizzare la mesh scompone il modello in più piccole porzioni.

65 a seconda della grandezza del modello sono stati utilizzati più punti di controllo, con un minimo di 4 per le pareti più semplici

66 il controllo della mesh è un processo che è stato spesso necessario per i primi programmi di fotomodellazione [Fantini in Bertocci et al. 2015]

CAPITOLO 7 Atlante dei rilievi delle fortificazioni di Piombino

Nelle seguenti pagine sono illustrati i risultati dei rilievi delle fortificazioni di Piombino; le metodologie di rilevamento che sono state mostrate nel capitolo precedente hanno creato i database morfologici tridimensionali che sono stati necessari alla restituzione dei disegni 2d su Autocad. Le procedure di restituzione seguite sono quelle tradizionali che da anni ormai sono adottate nel gruppo di ricerca e consistono in una prima fase di elaborazione del dato tridimensionale, tagliando con dei piani di taglio la nuvola di punti ed estraendo le immagini rettificate delle sezioni desiderate ad alta qualità¹. Le immagini sono state successivamente importate in CAD e mosaicate per ricomporre l'immagine della sezione: i disegni sono stati realizzati seguendo una classificazione per livelli che permette di conferire alle linee sia una gerarchia in base del peso grafico, distinguendo tra linee di sezione, di proiezione e tra i vari piani di proiezione, dal più vicino al più lontano, sia in base alla natura dell'oggetto rappresentato, delle texture di dettaglio, siano esse pietre piuttosto che vegetazione o altri tipi di oggetti. L'utilizzo di livelli normalizzati ha permesso di uniformare la grafica dei rilievi. Gli elaborati grafici in seguito presentati sono stati realizzati seguendo tre differenti tipologie di rappresentazione: una prima in cui le sezioni sono state infatti realizzate a filo ferro, fornendo le sole informazioni utili alla definizione della morfologia degli edifici alla scala architettonica 1:50; una seconda in cui il dato è stato graficamente integrato con le immagini fornite dalle rasterizzazioni delle nuvole di punti, permettendo di fornire ai disegni una sorta di matericità; una terza in cui sono stati realizzati gli ortomosaici dei modelli SfM e sono state applicate le texture fotografiche alle

fortificazioni. Il *corpus* di elaborati grafici così realizzati, oltre a fornire la documentazione digitale, ad oggi ancora manchevole, delle fortificazioni ancora esistenti della città di Piombino, saranno utili ai fini della trattazione per più motivi: da un lato saranno necessarie per approfondire lo studio dei fabbricati, riferendo le informazioni viste nelle analisi storiche alle forme reali dell'architettura, fornendo uno strumento utile a verificare l'attendibilità e la corretta interpretazione delle fonti documentarie; dall'altro saranno fondamentali per effettuare un confronto con i disegni di Piombino realizzati da Leonardo da Vinci in modo tale da permettere la comprensione dei disegni del maestro; infine saranno utili in una fase di sviluppo ulteriore della ricerca per approfondire la conoscenza delle architetture, utilizzando i disegni come base per le restituzioni delle analisi conoscitive, come quelle stratigrafiche che potranno fornire ulteriori importanti informazioni per l'attribuzione delle architetture a un preciso periodo storico.

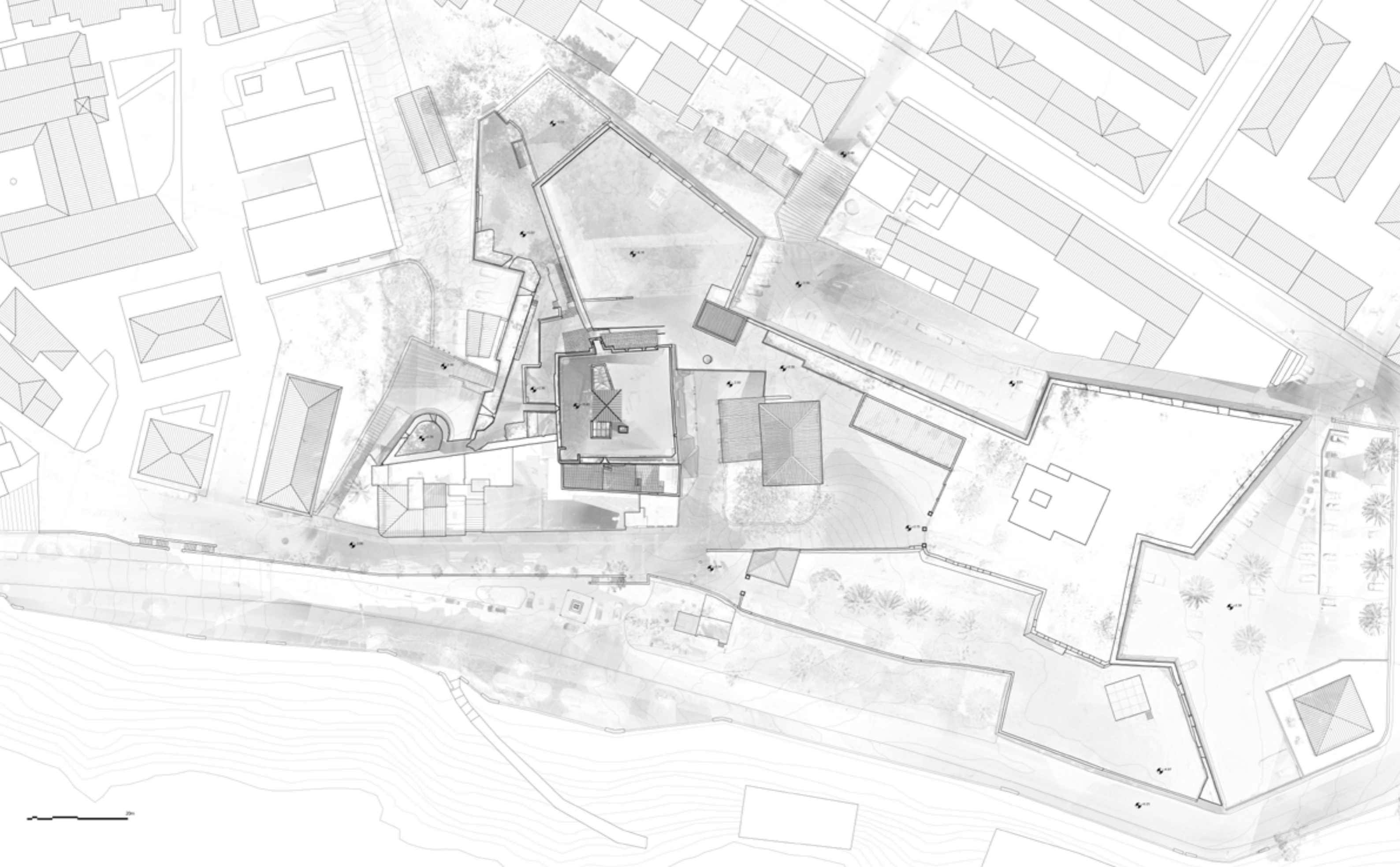
Note

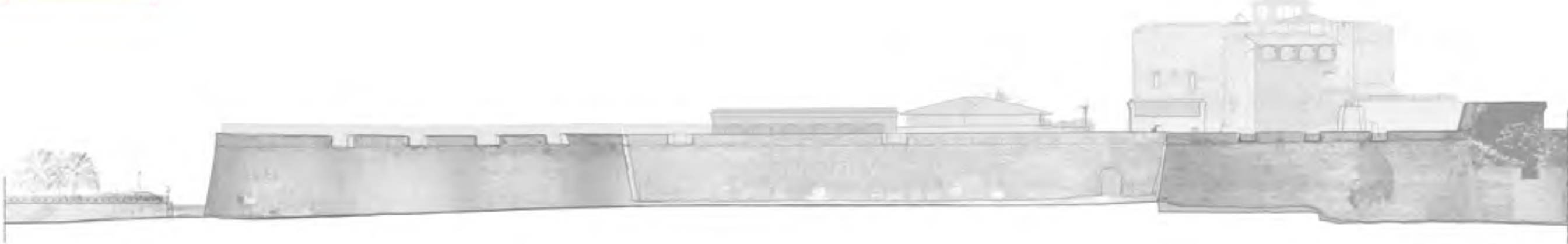
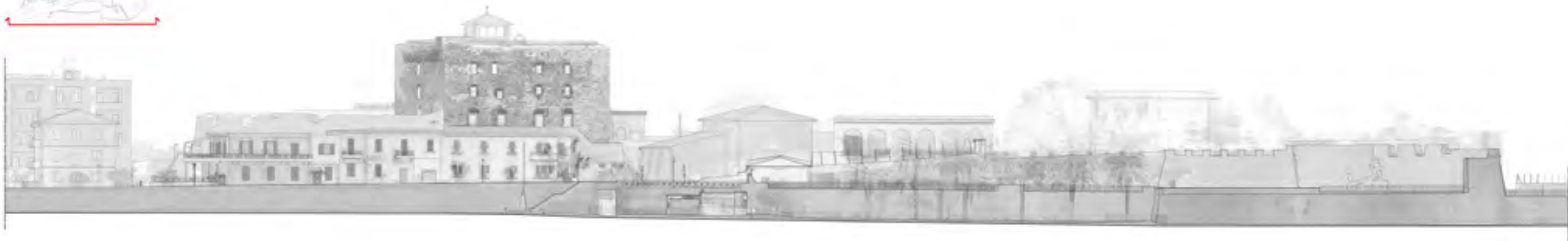
¹ per un approfondimento di queste metodologie vedi Pancani in Bertocci et al 2015

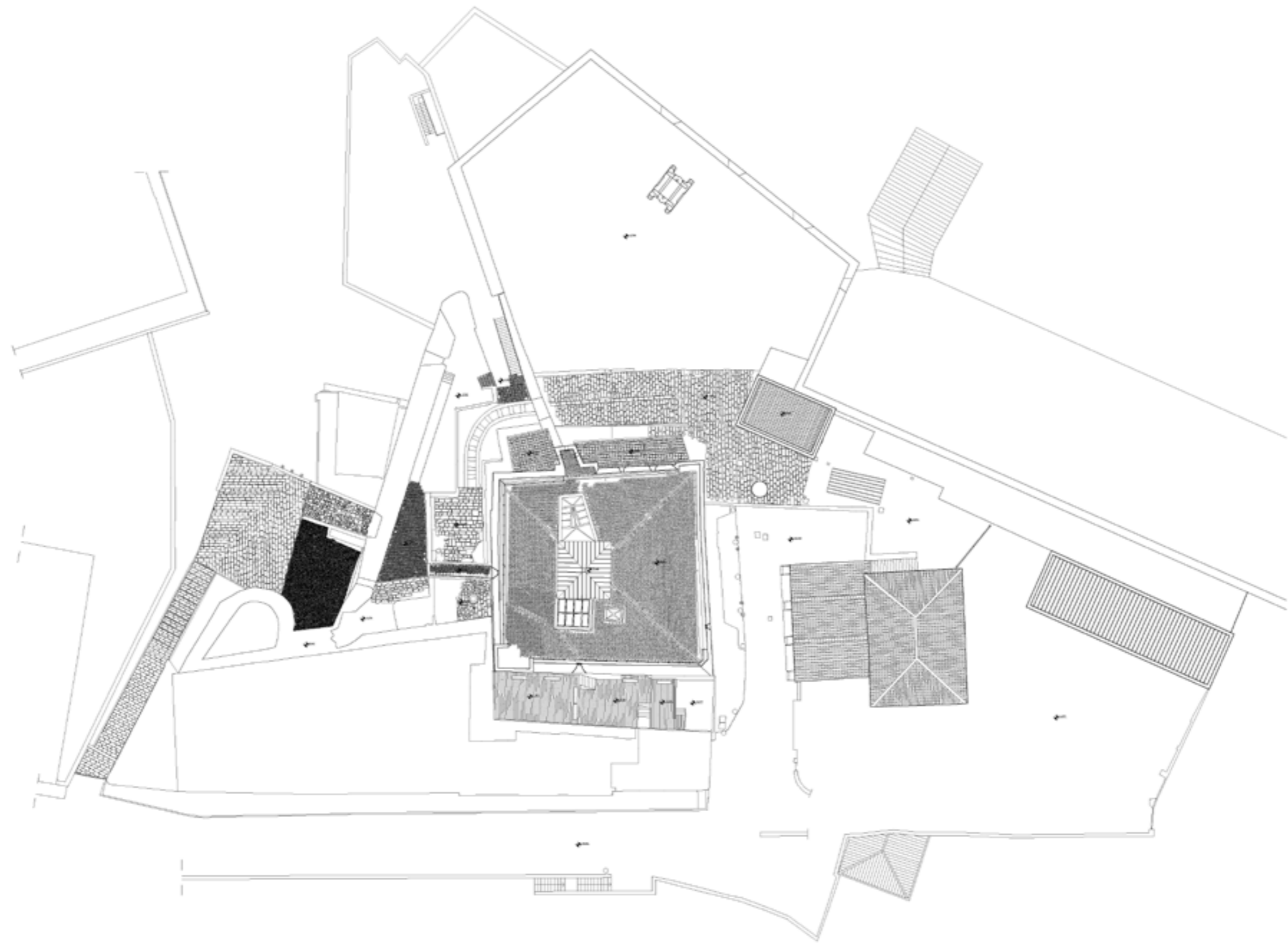


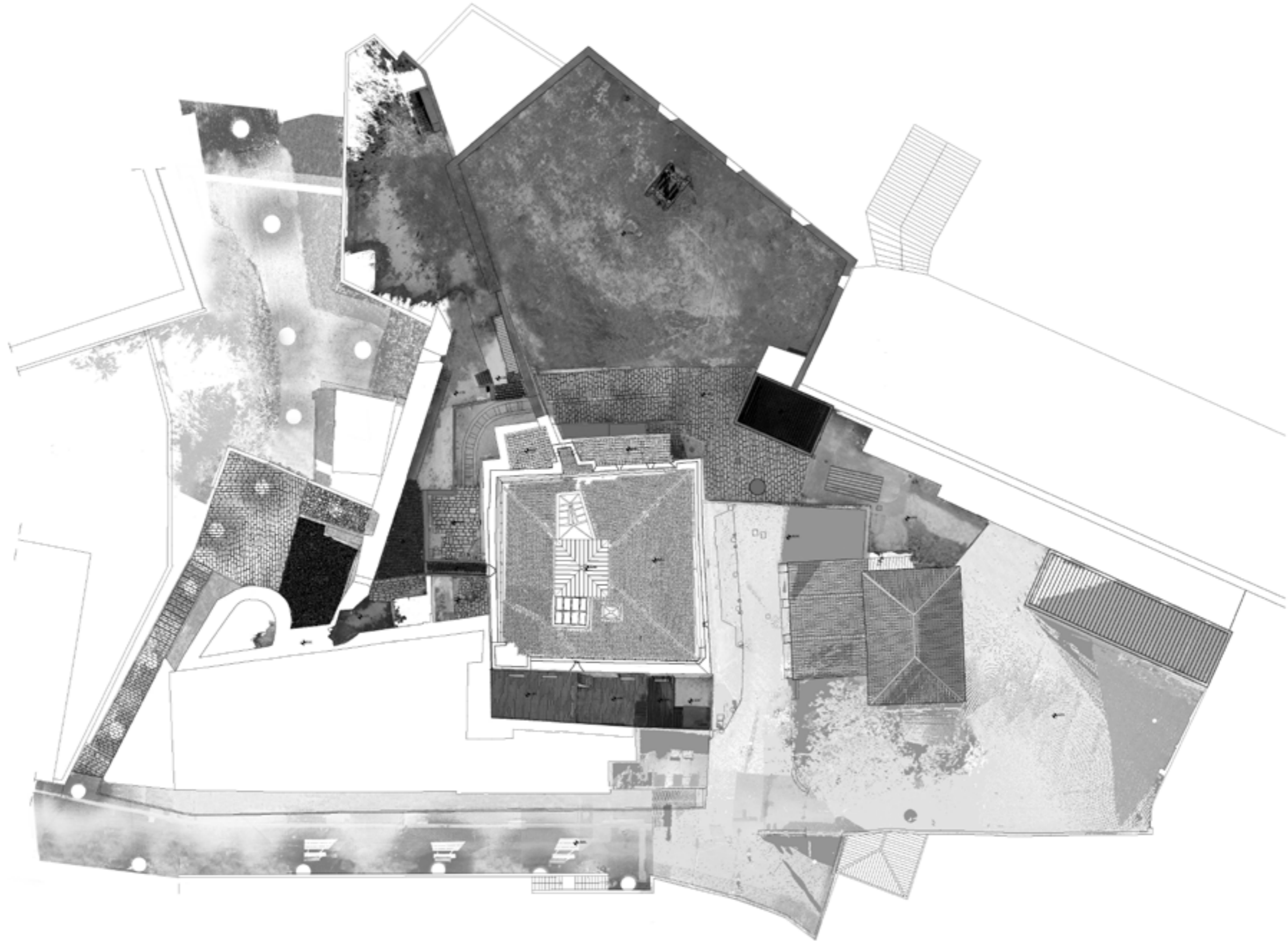
IL CASSERO



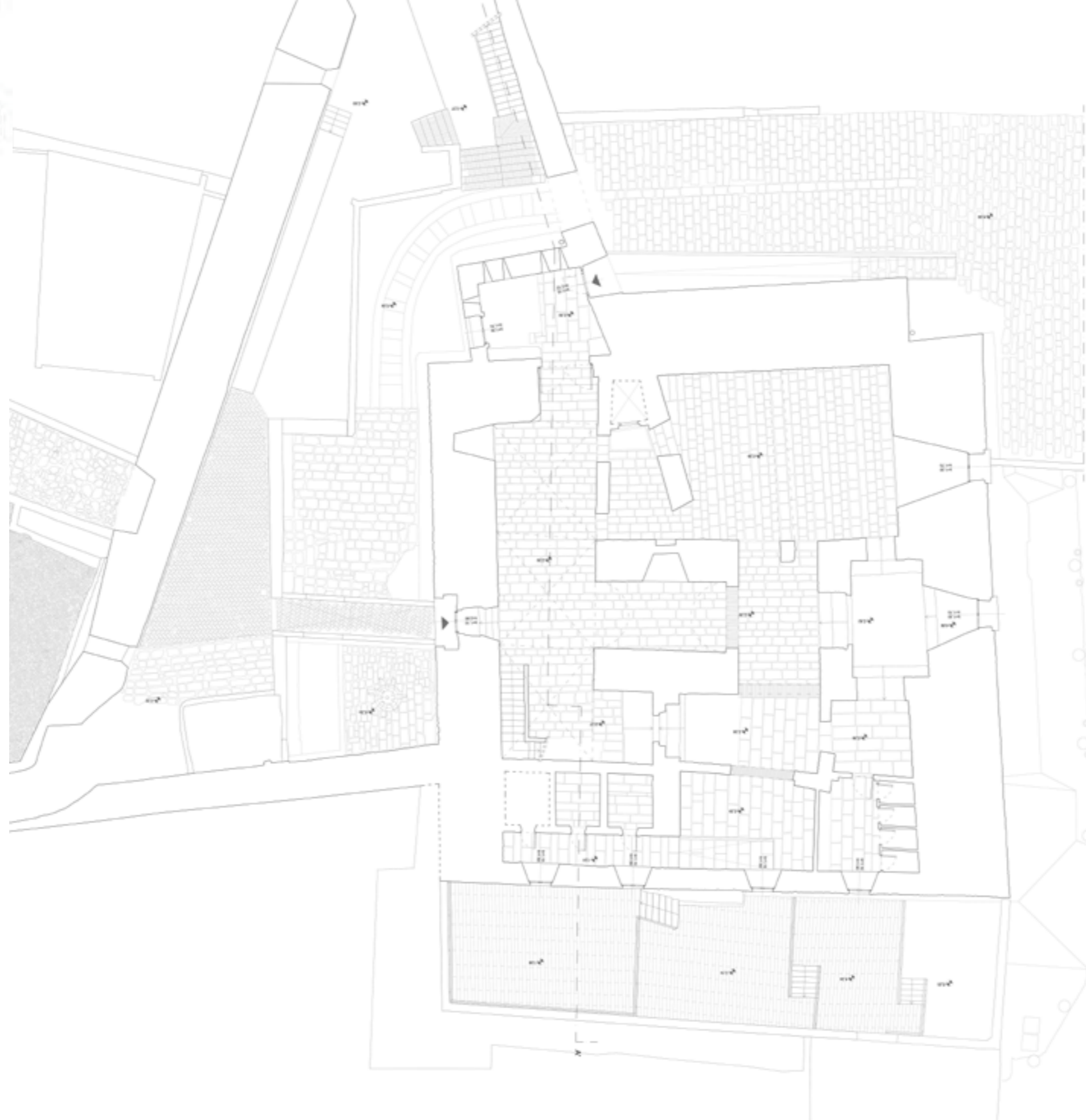




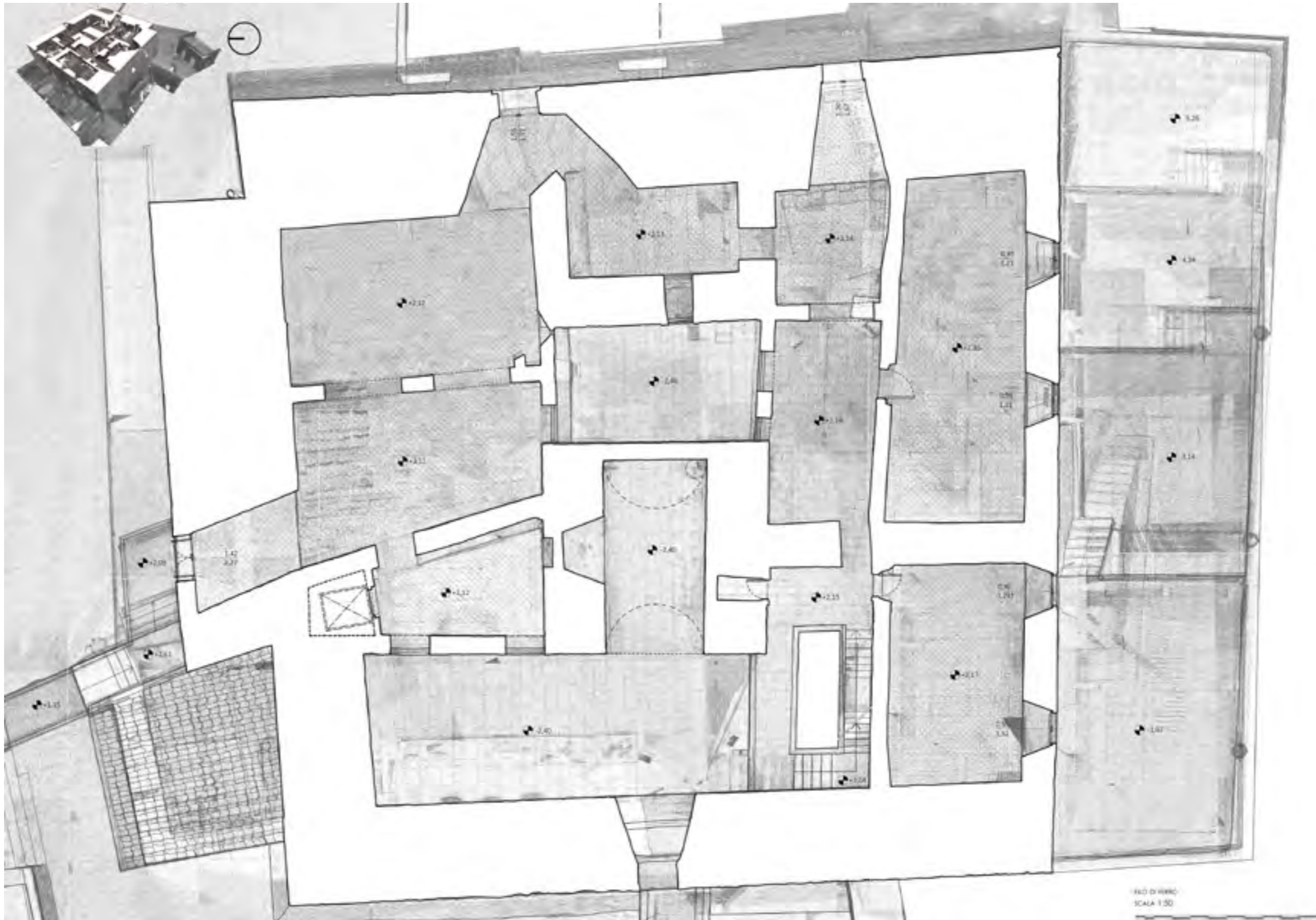


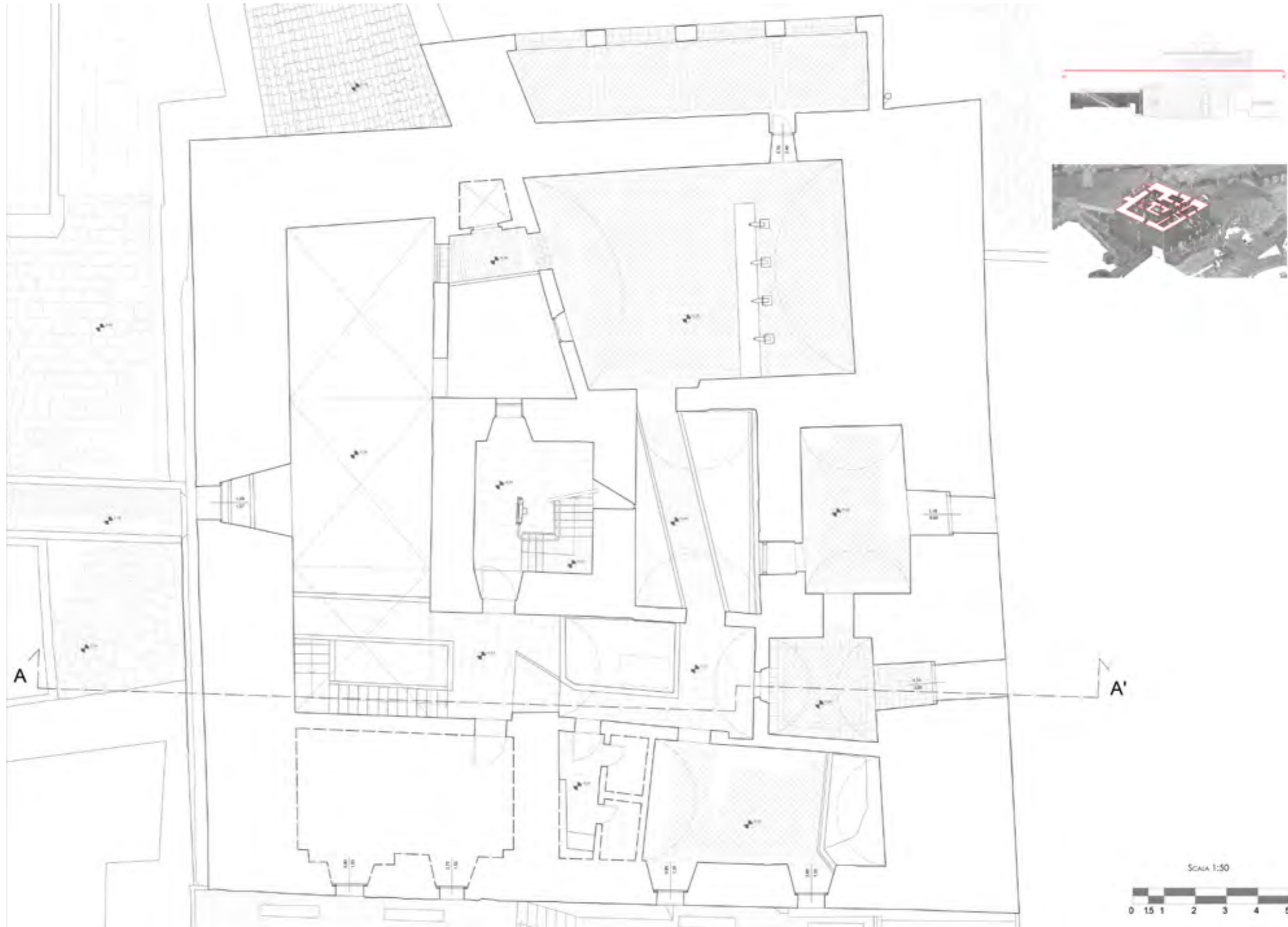


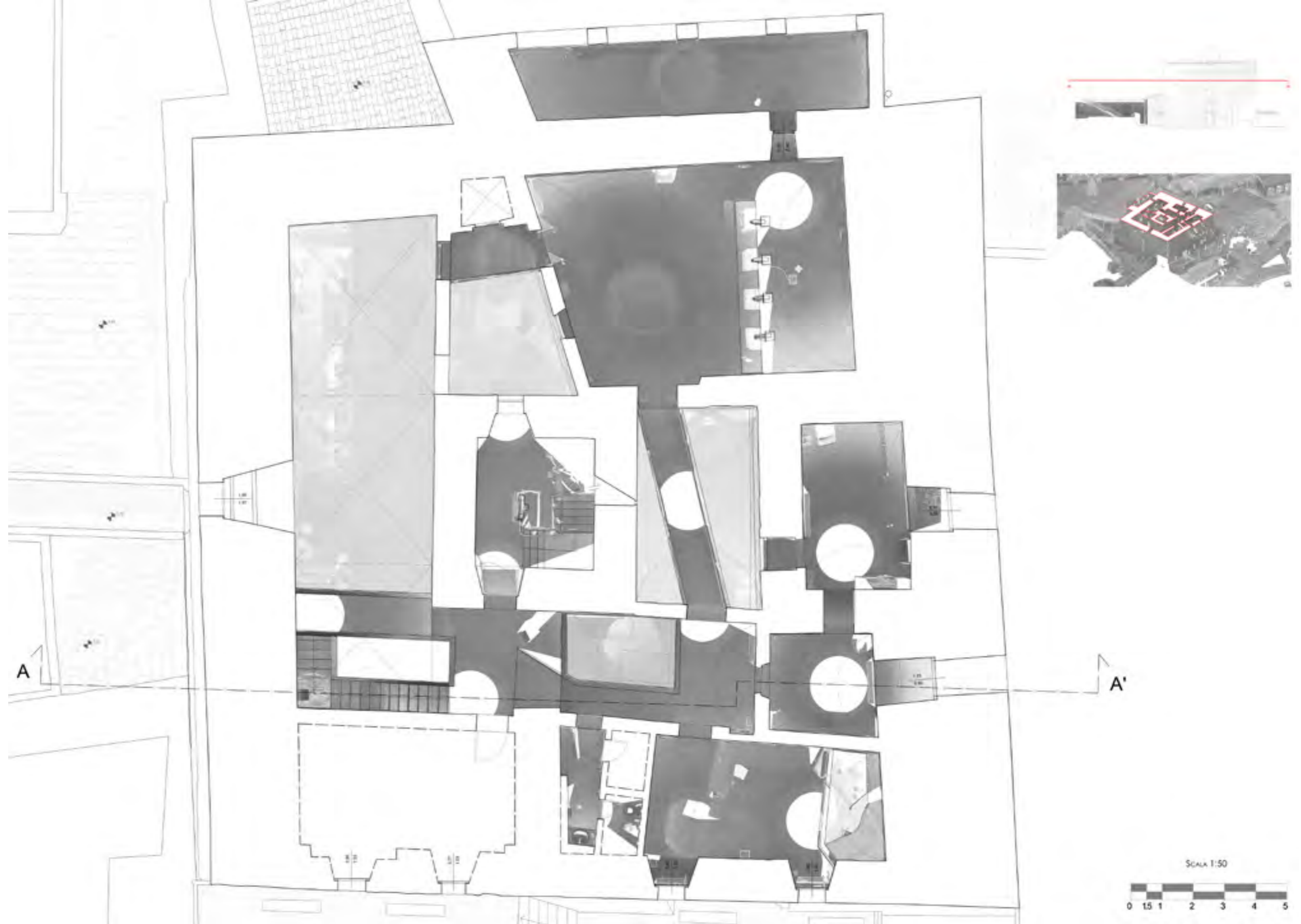


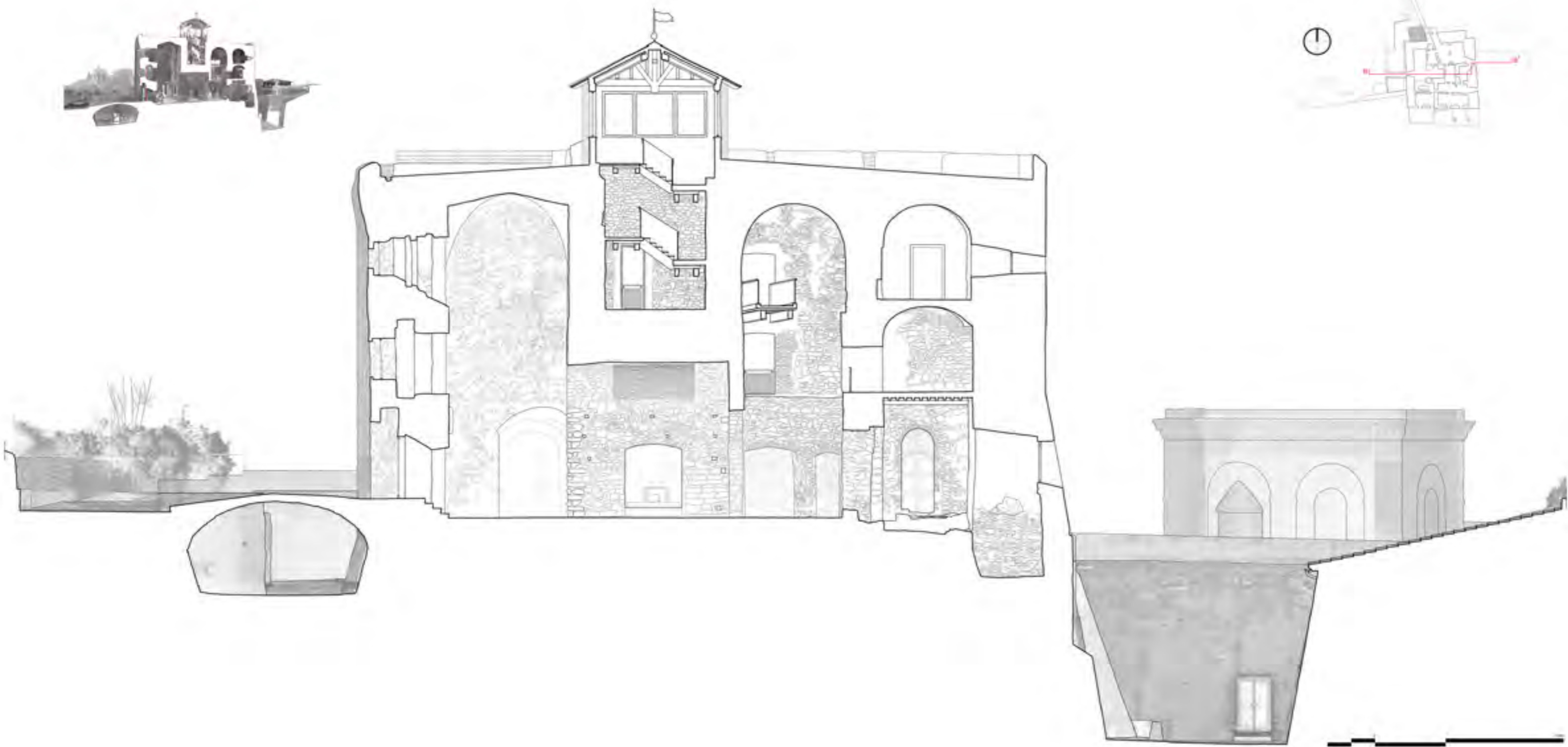


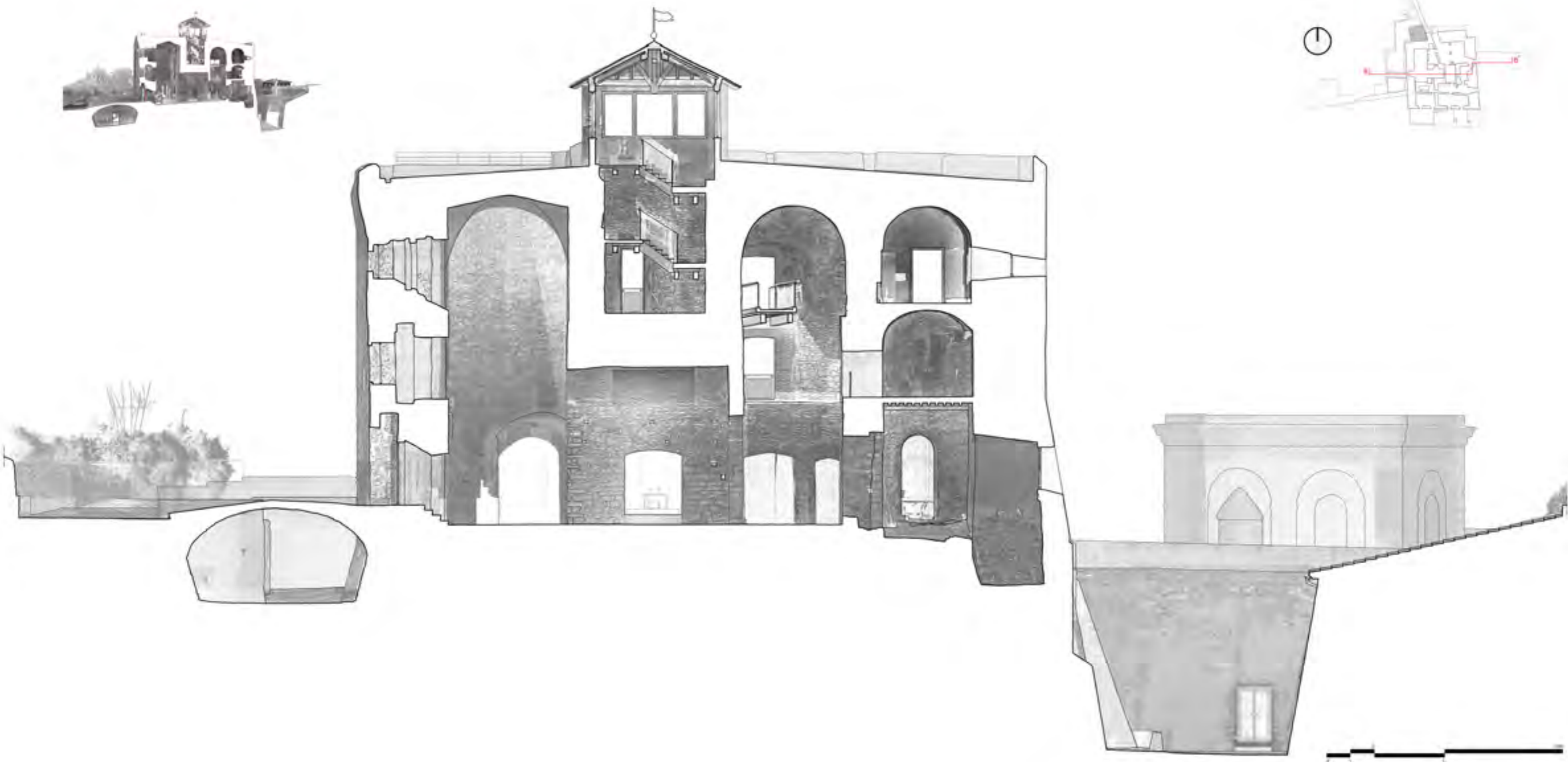


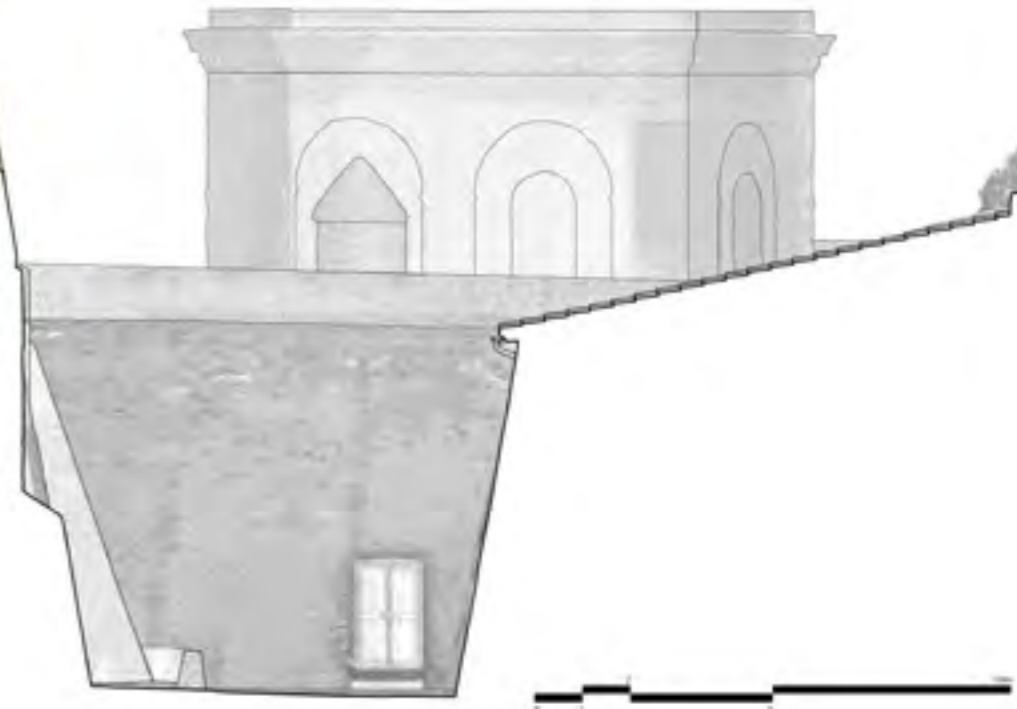
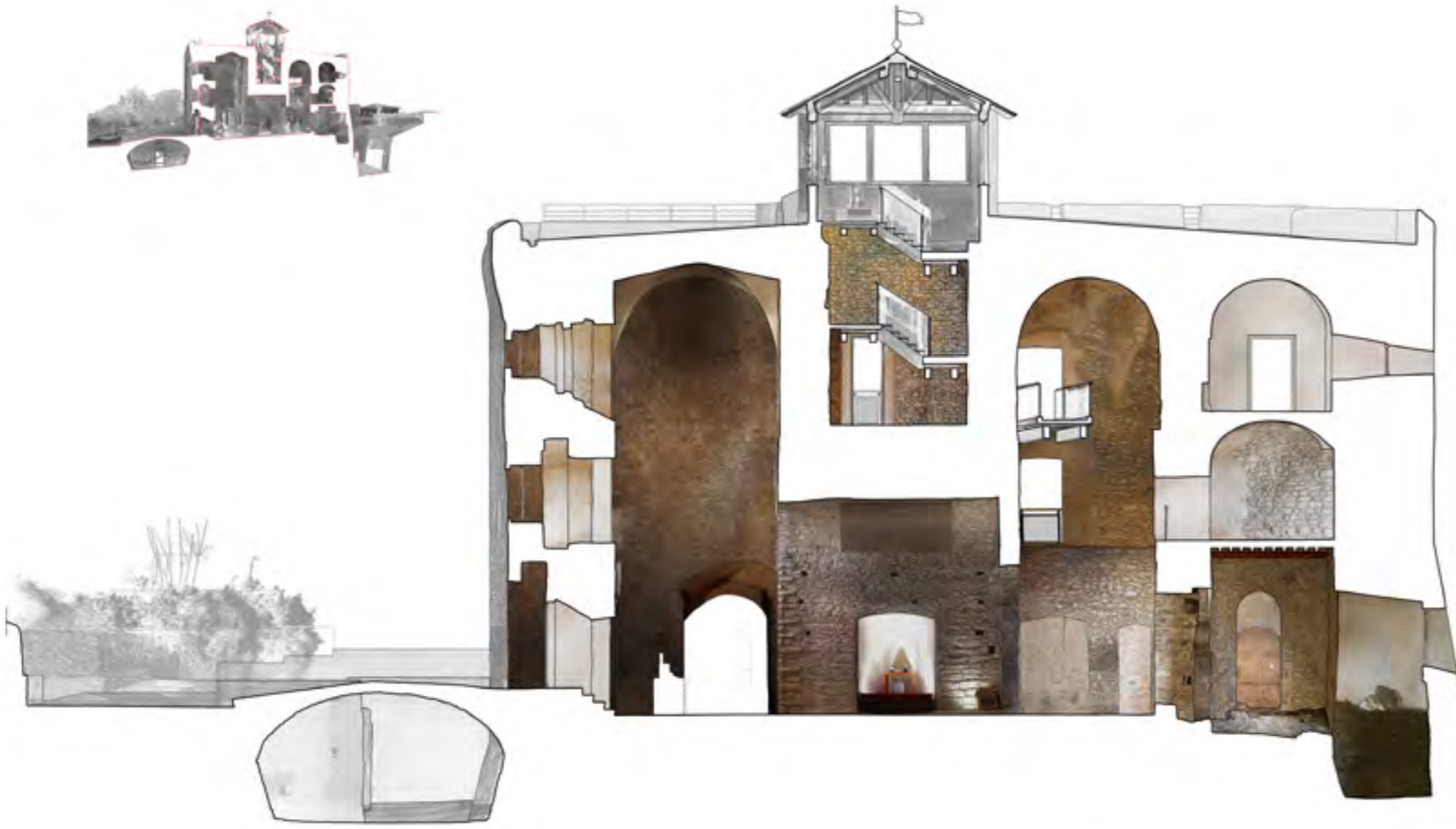


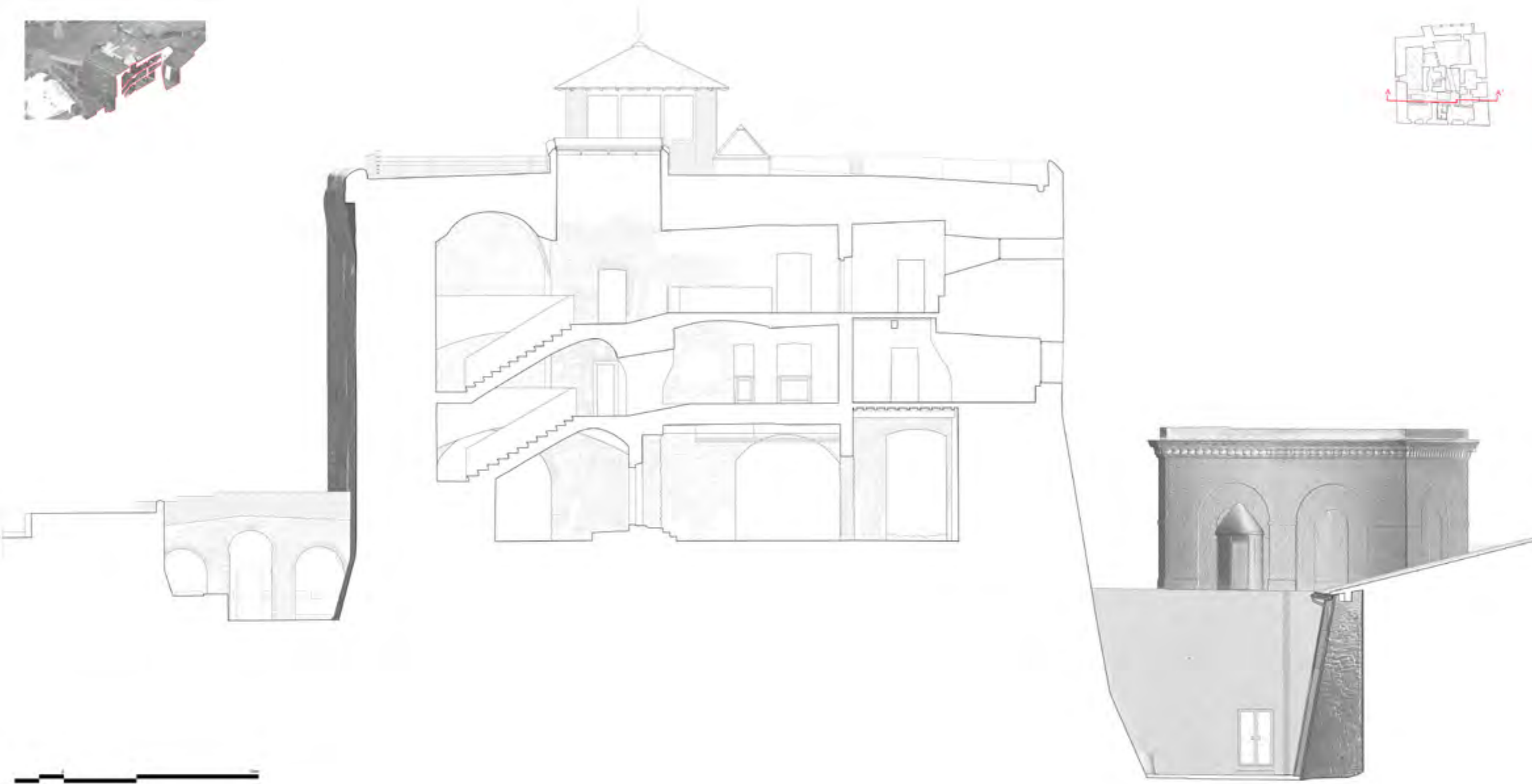


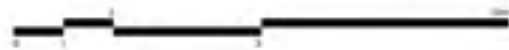
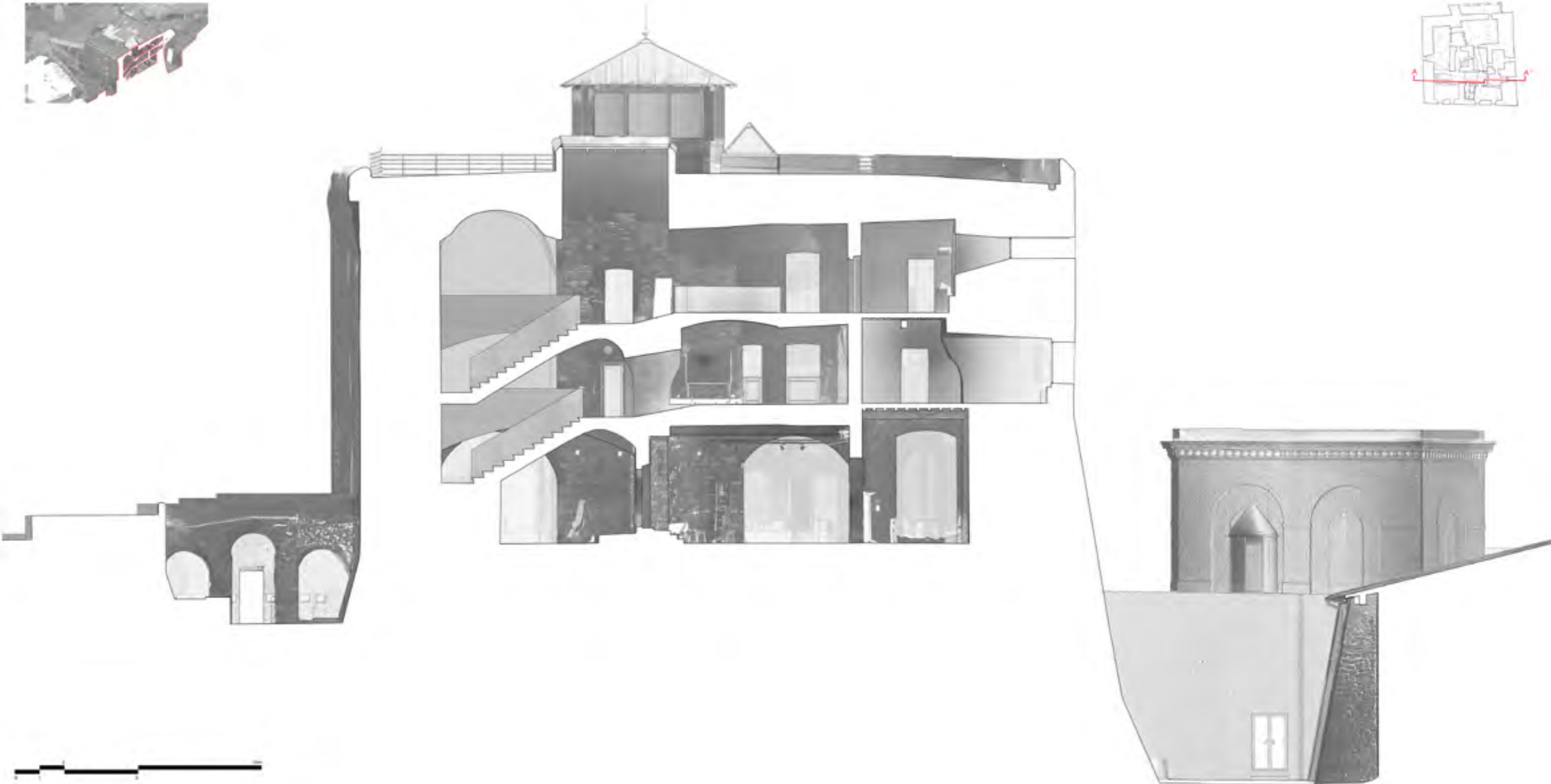


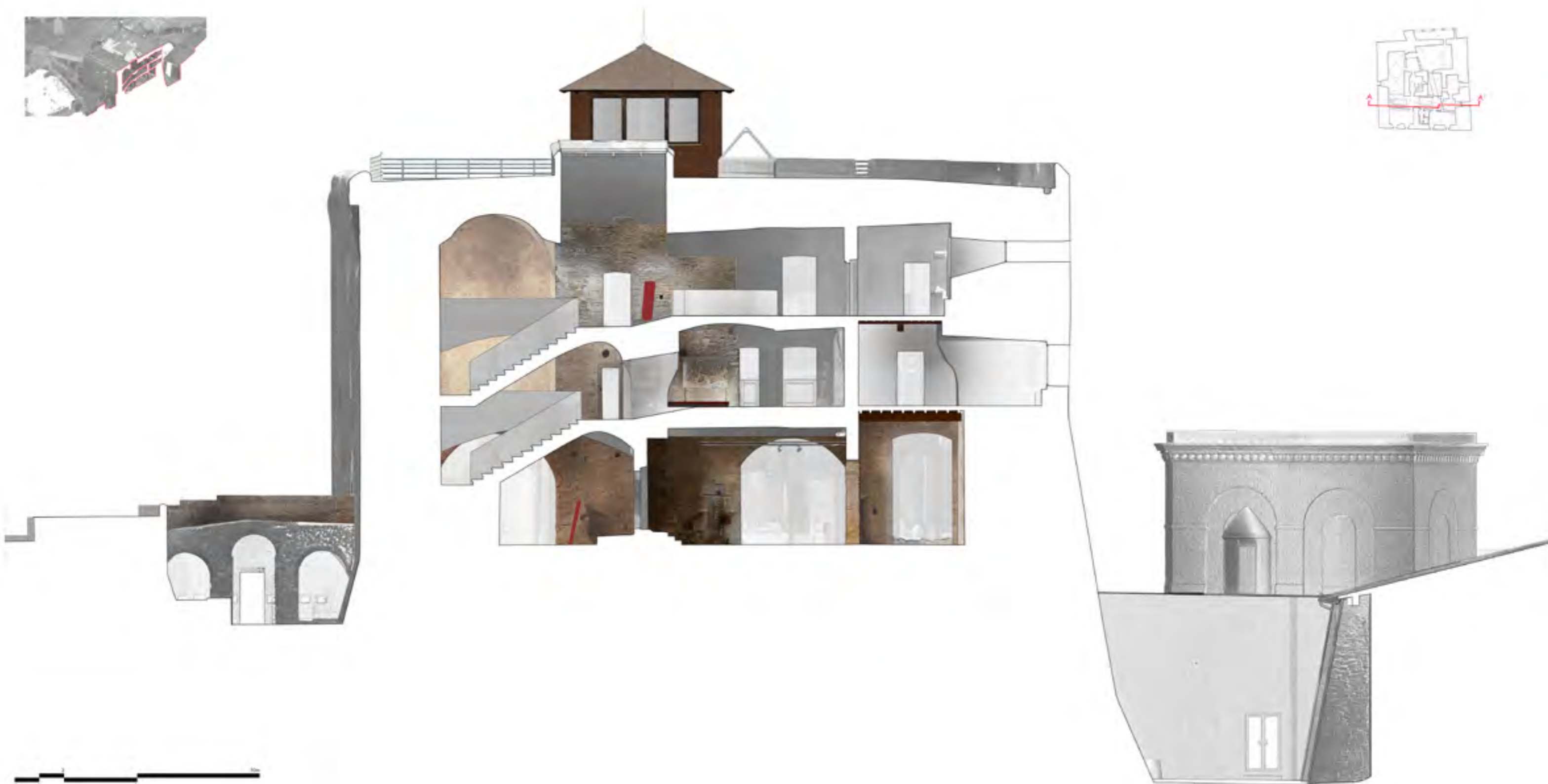


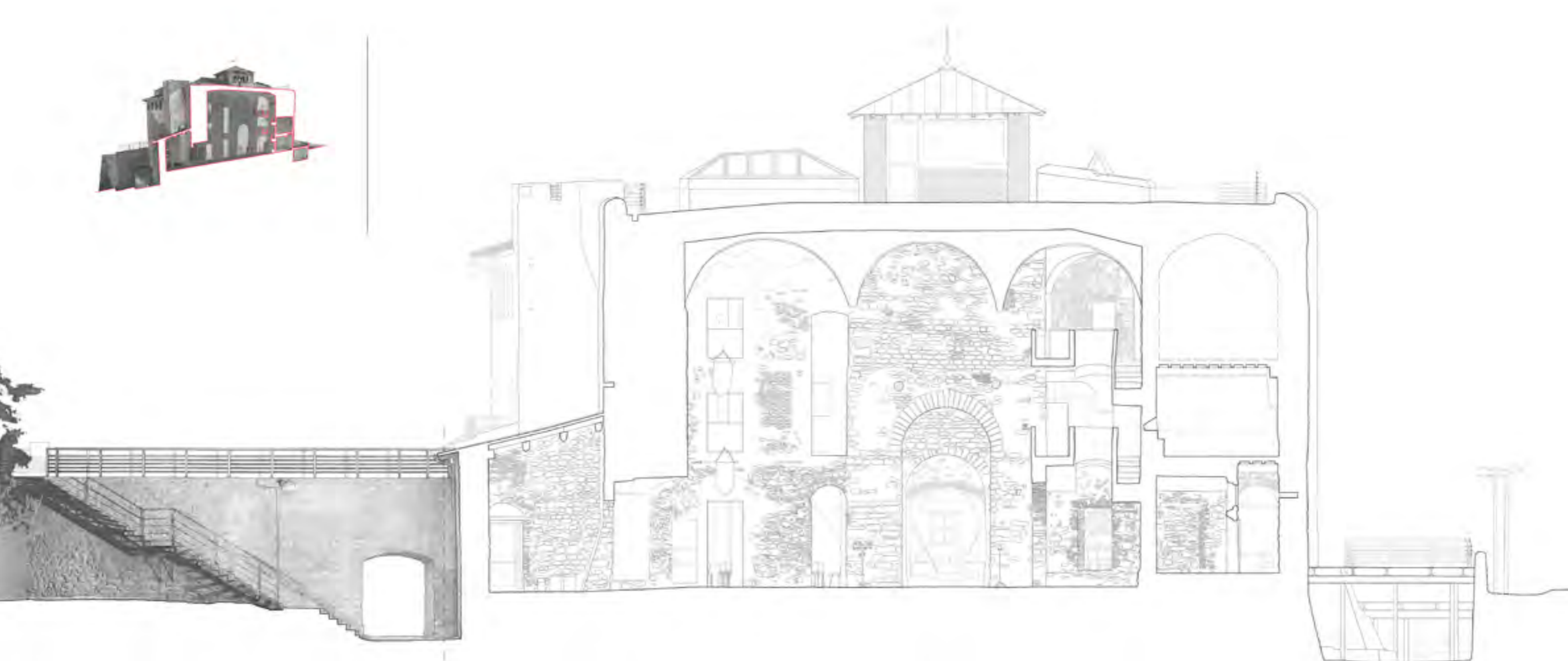


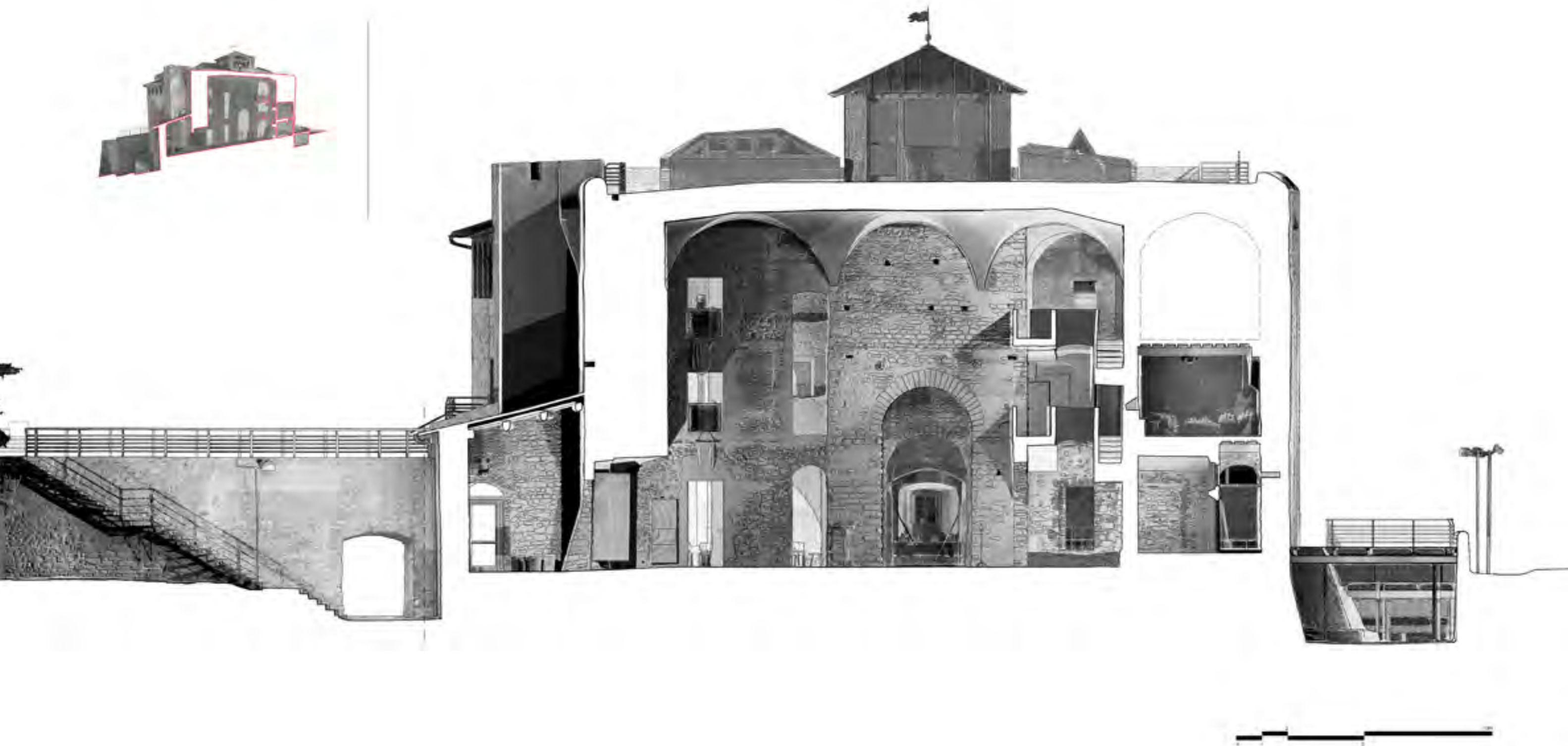


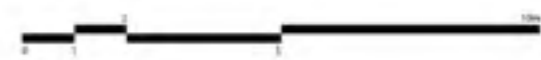
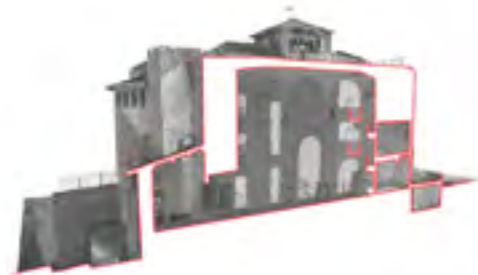


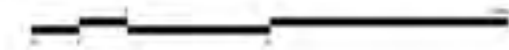
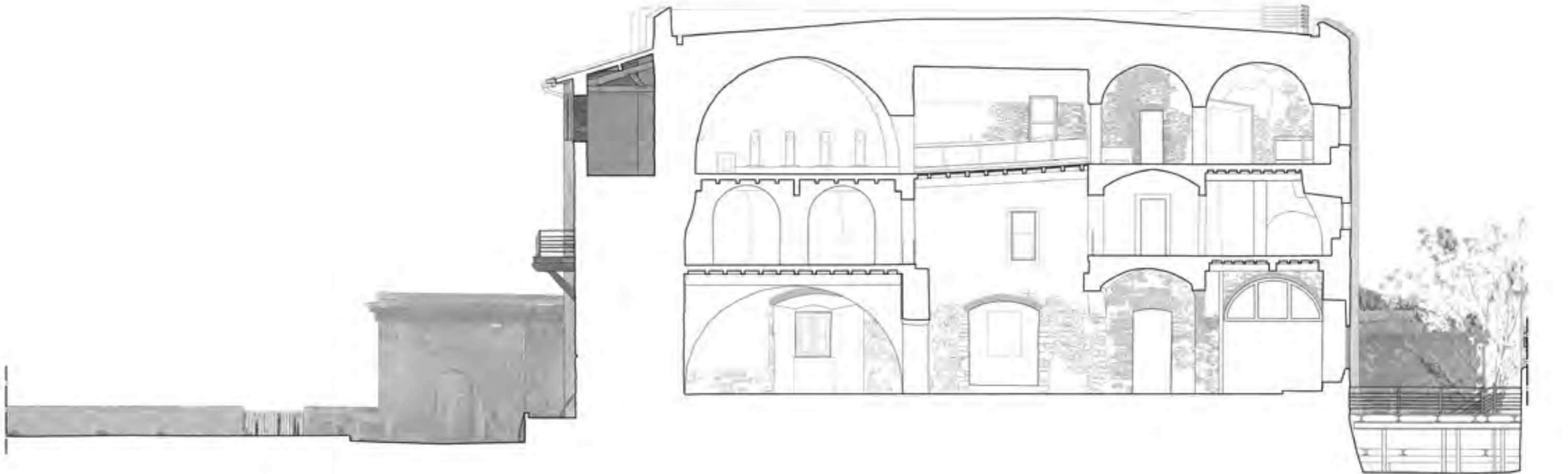


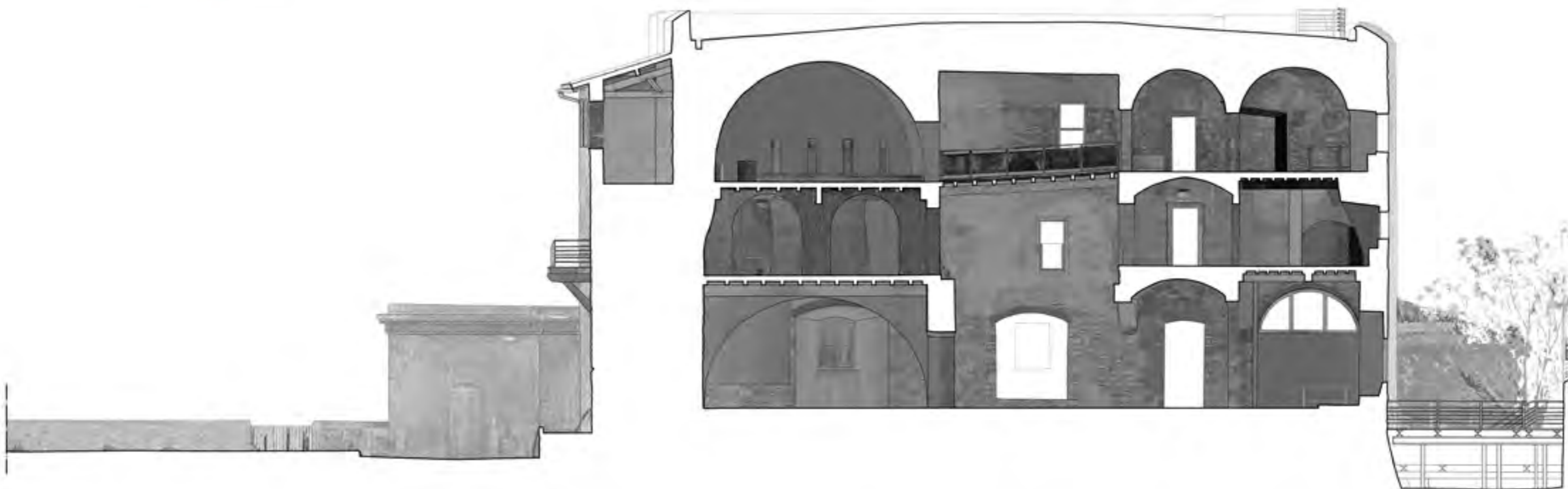


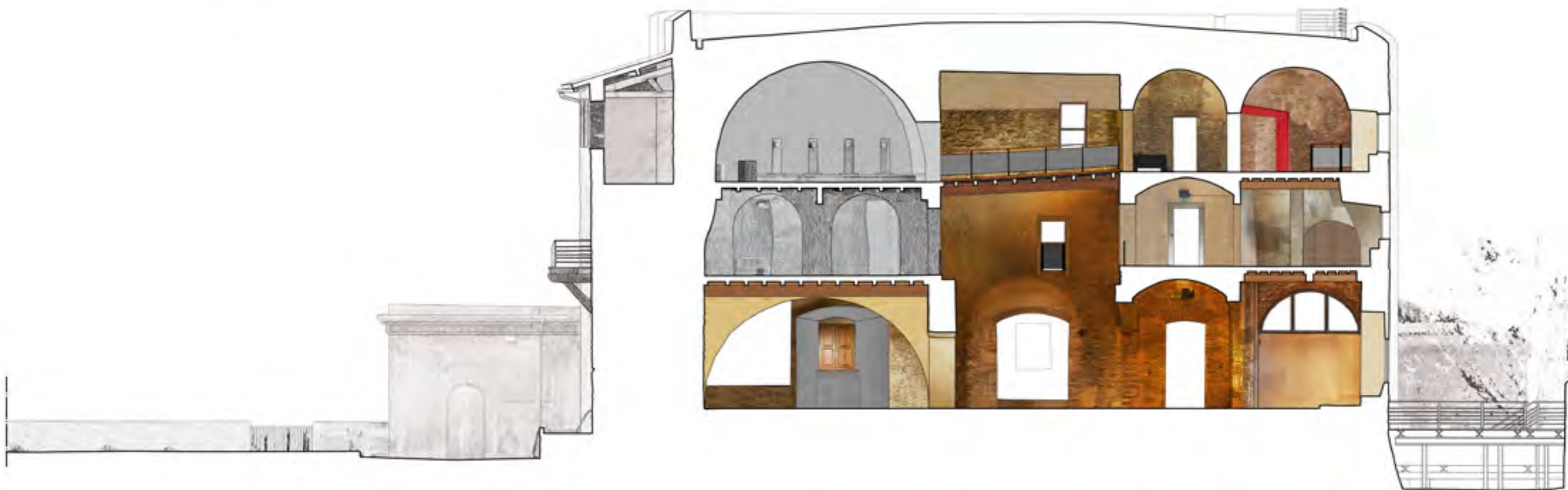


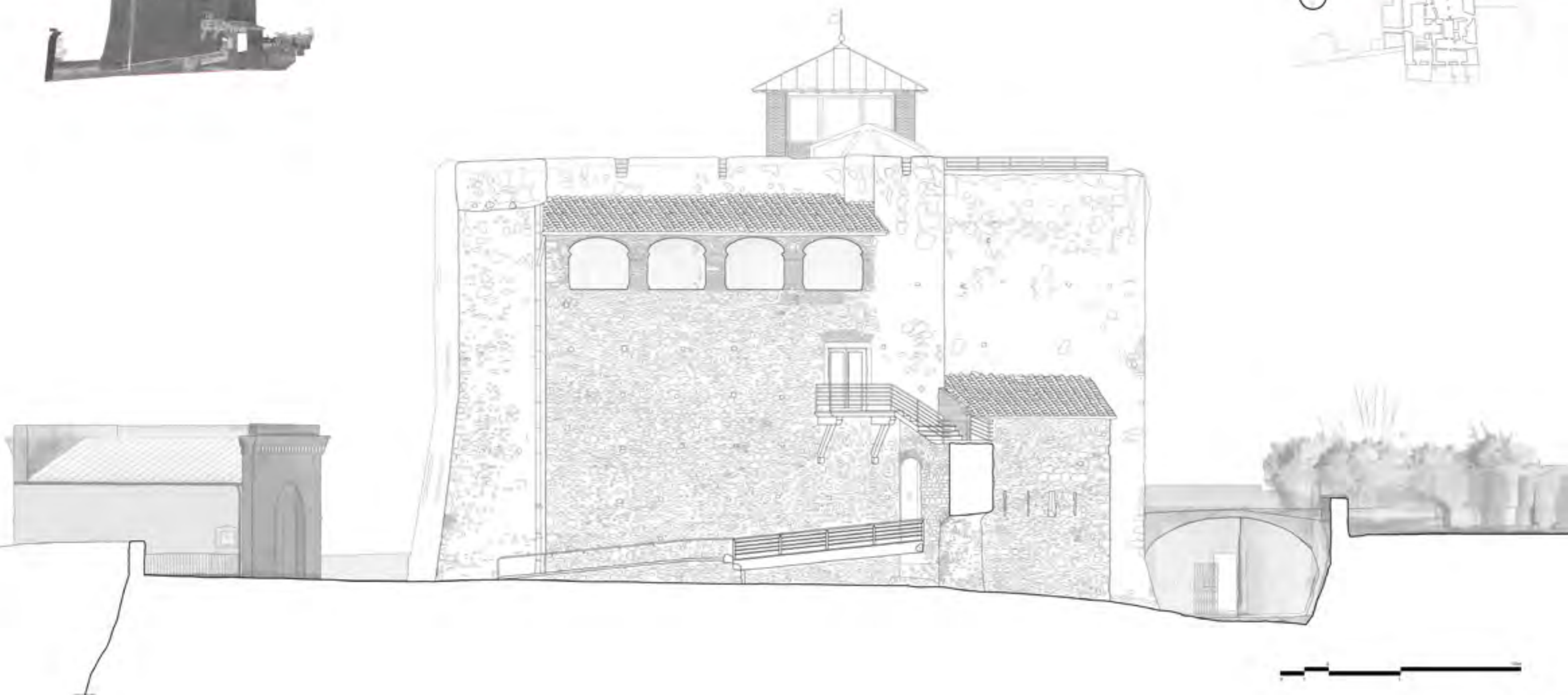


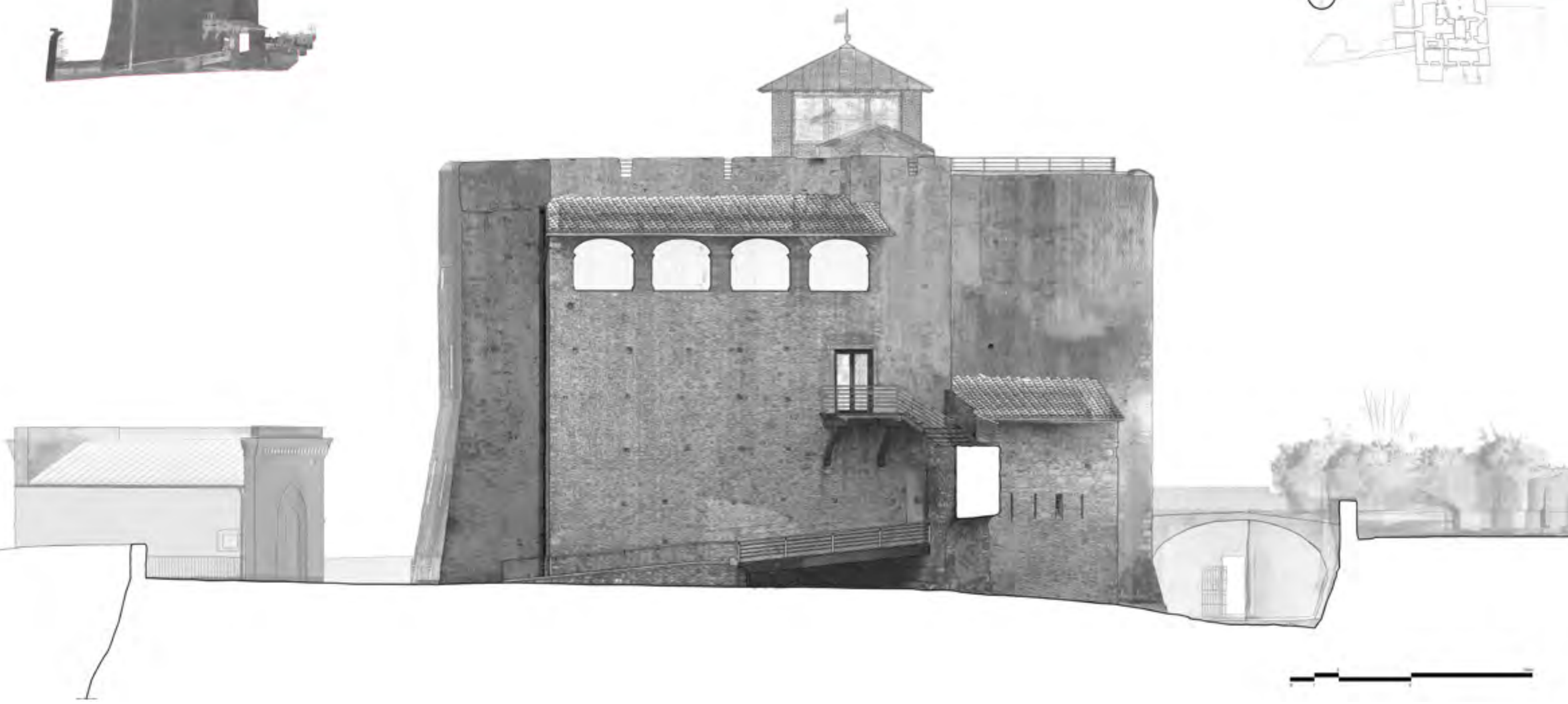




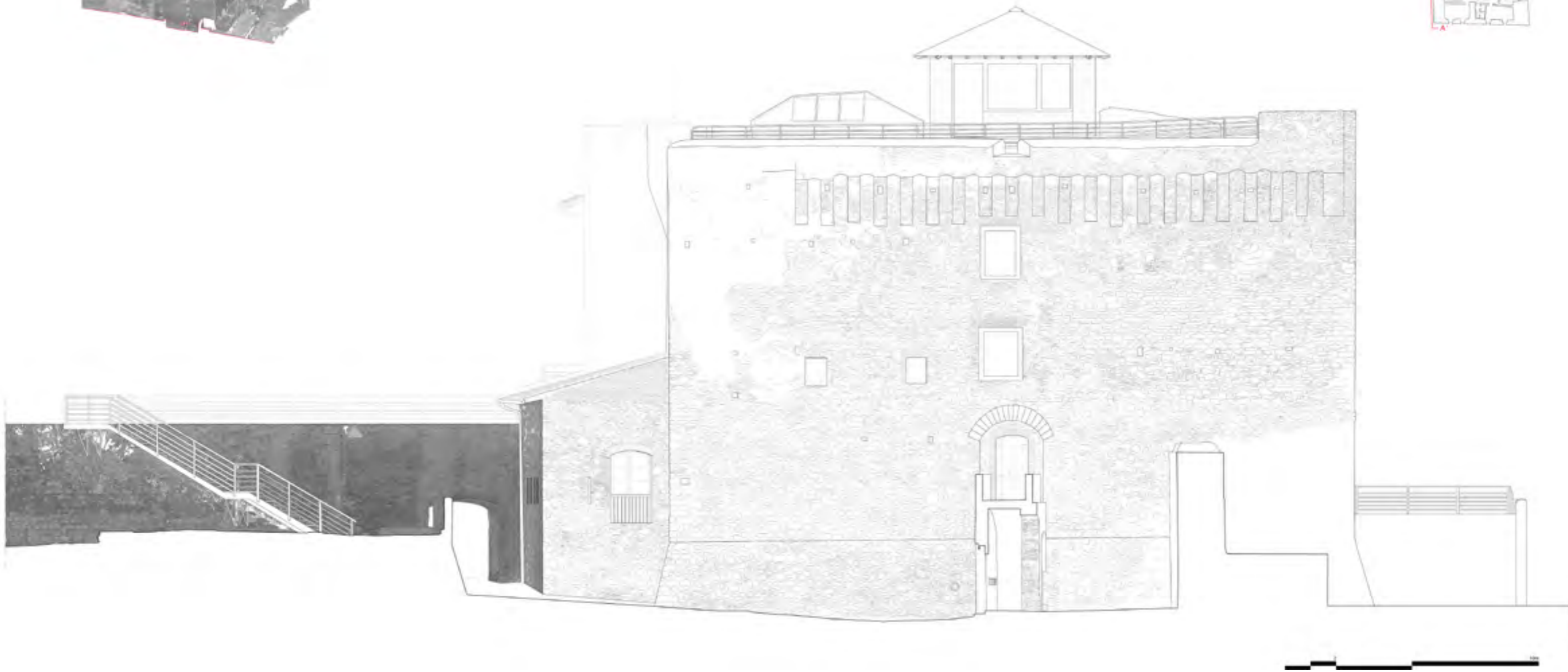


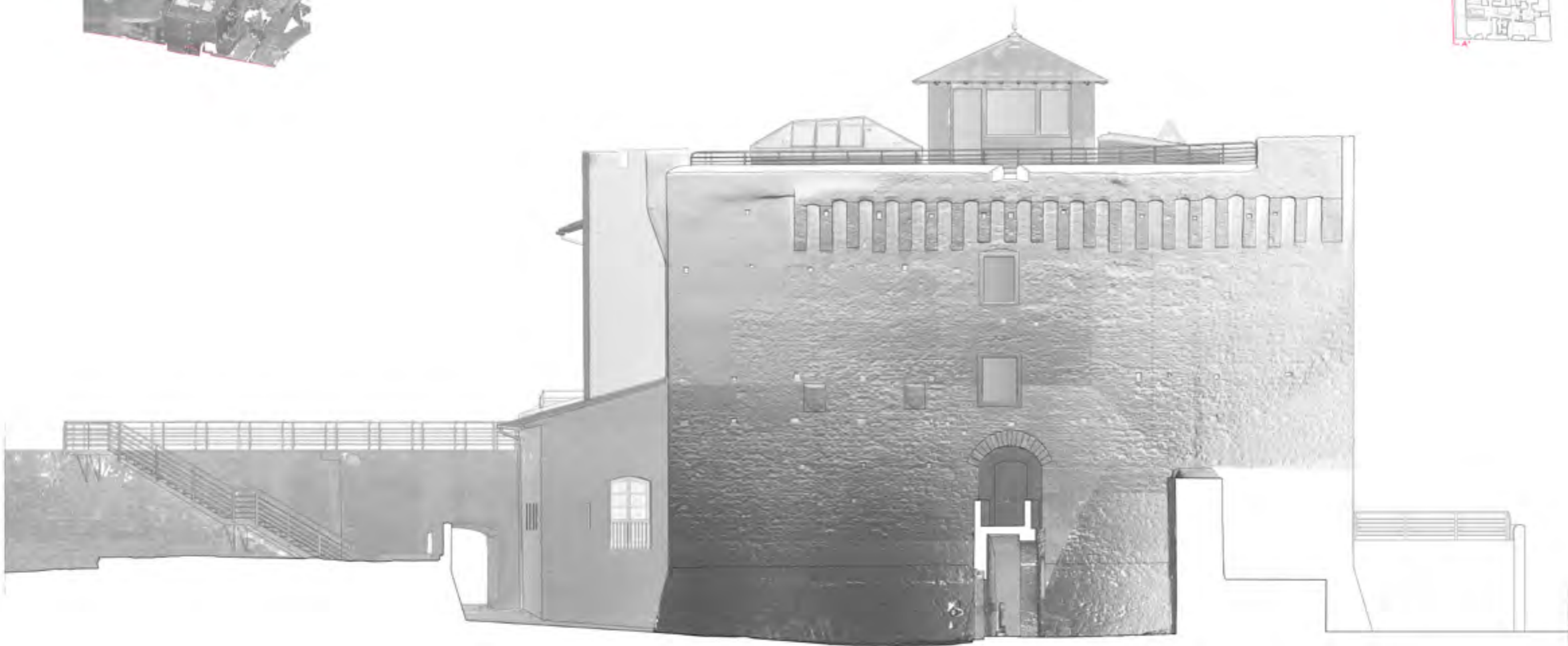


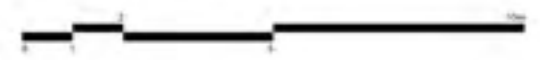


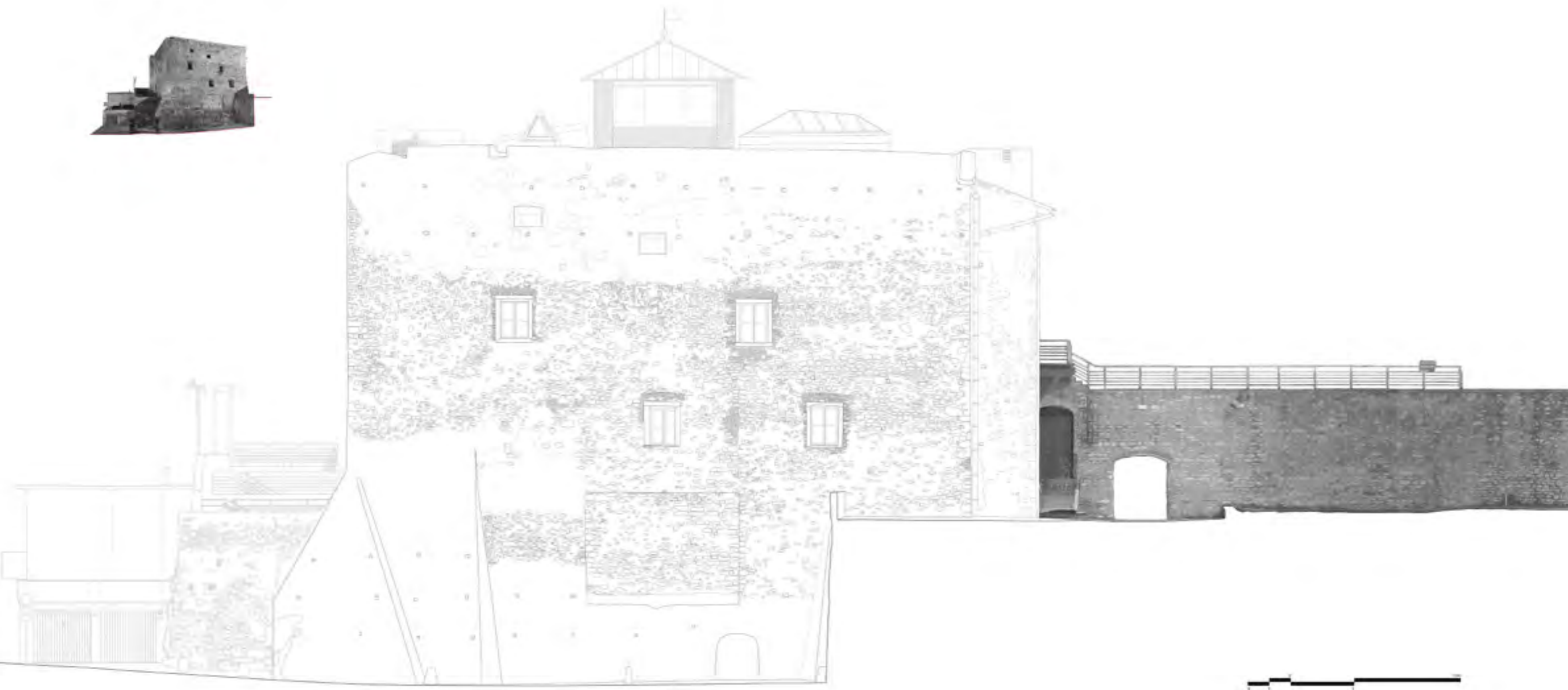


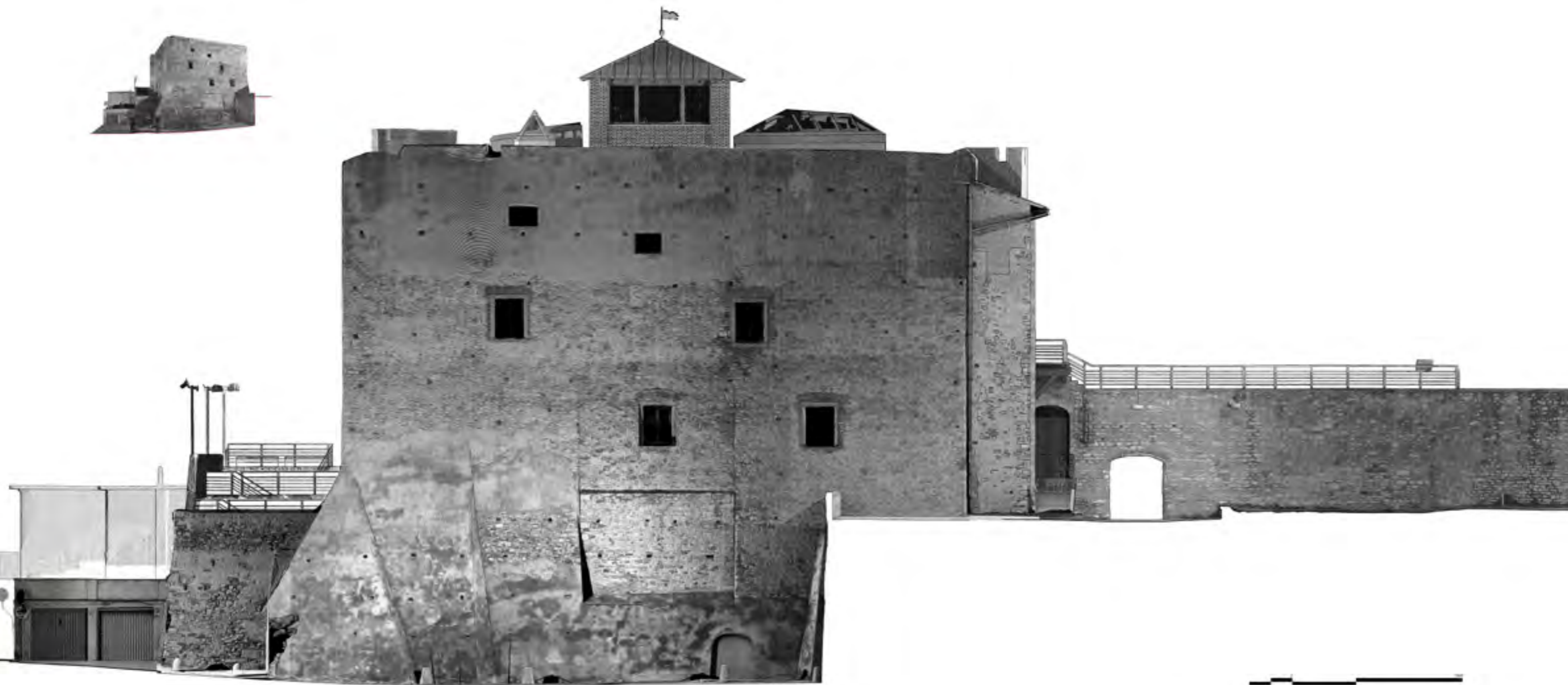




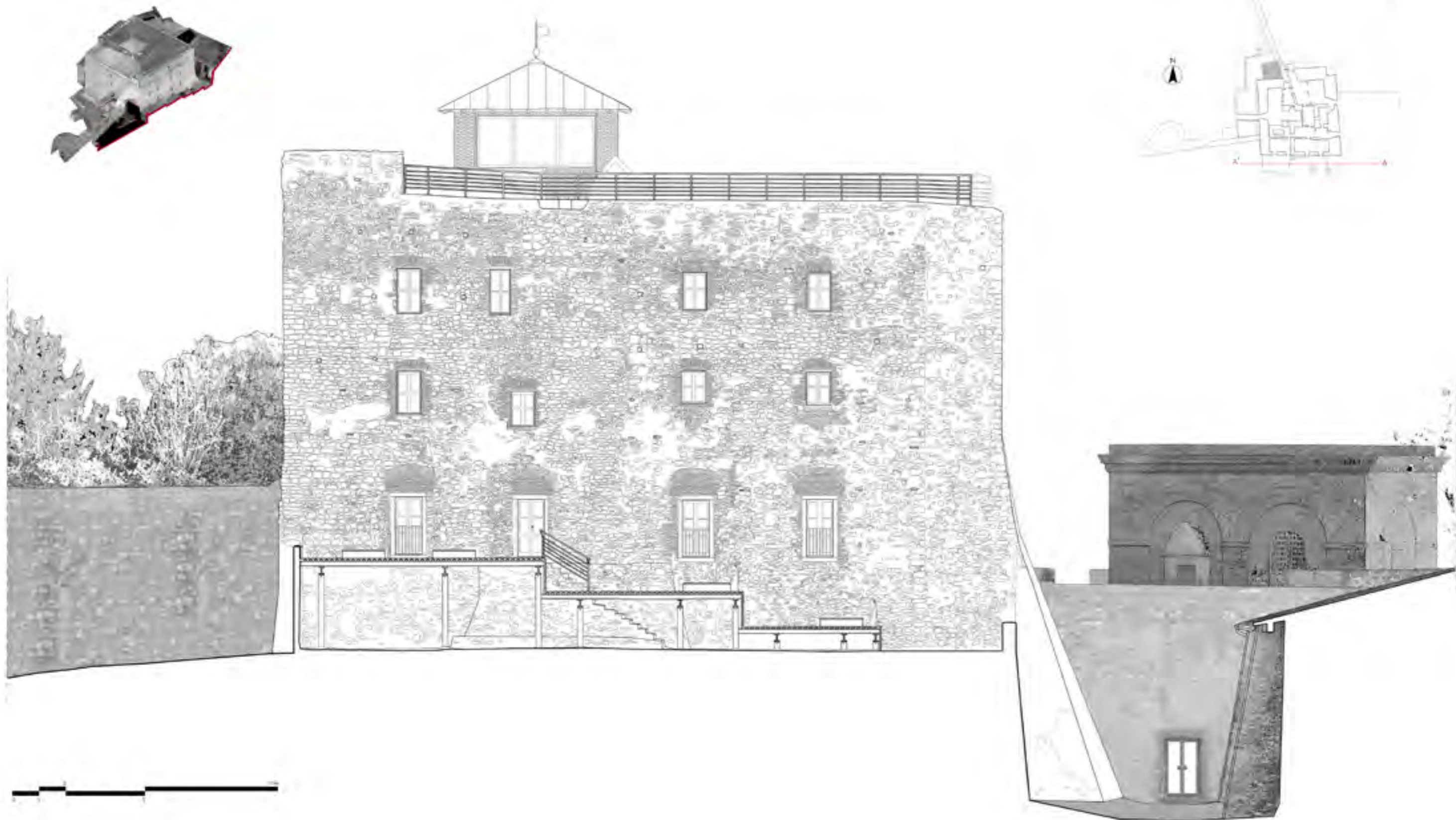


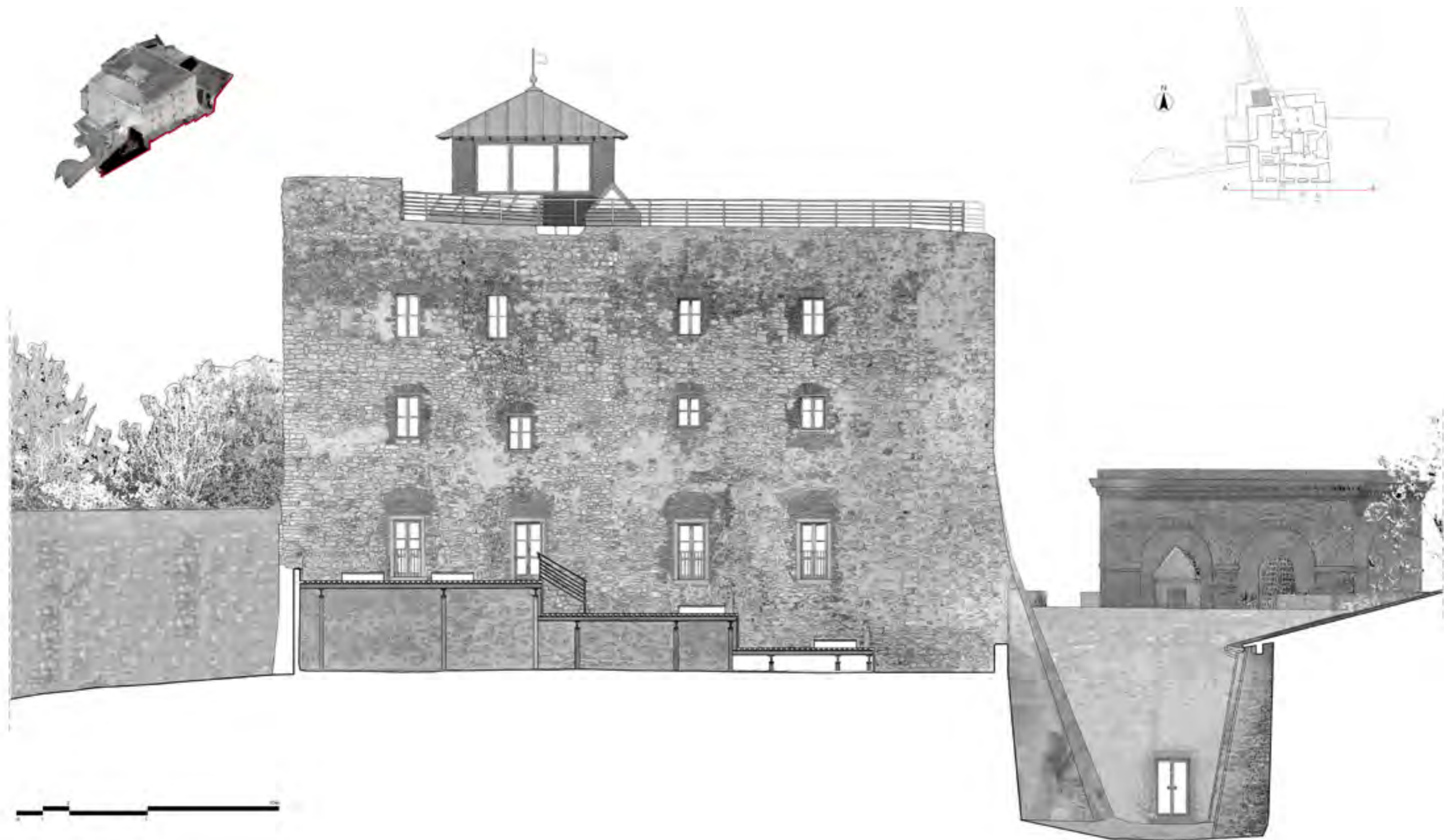










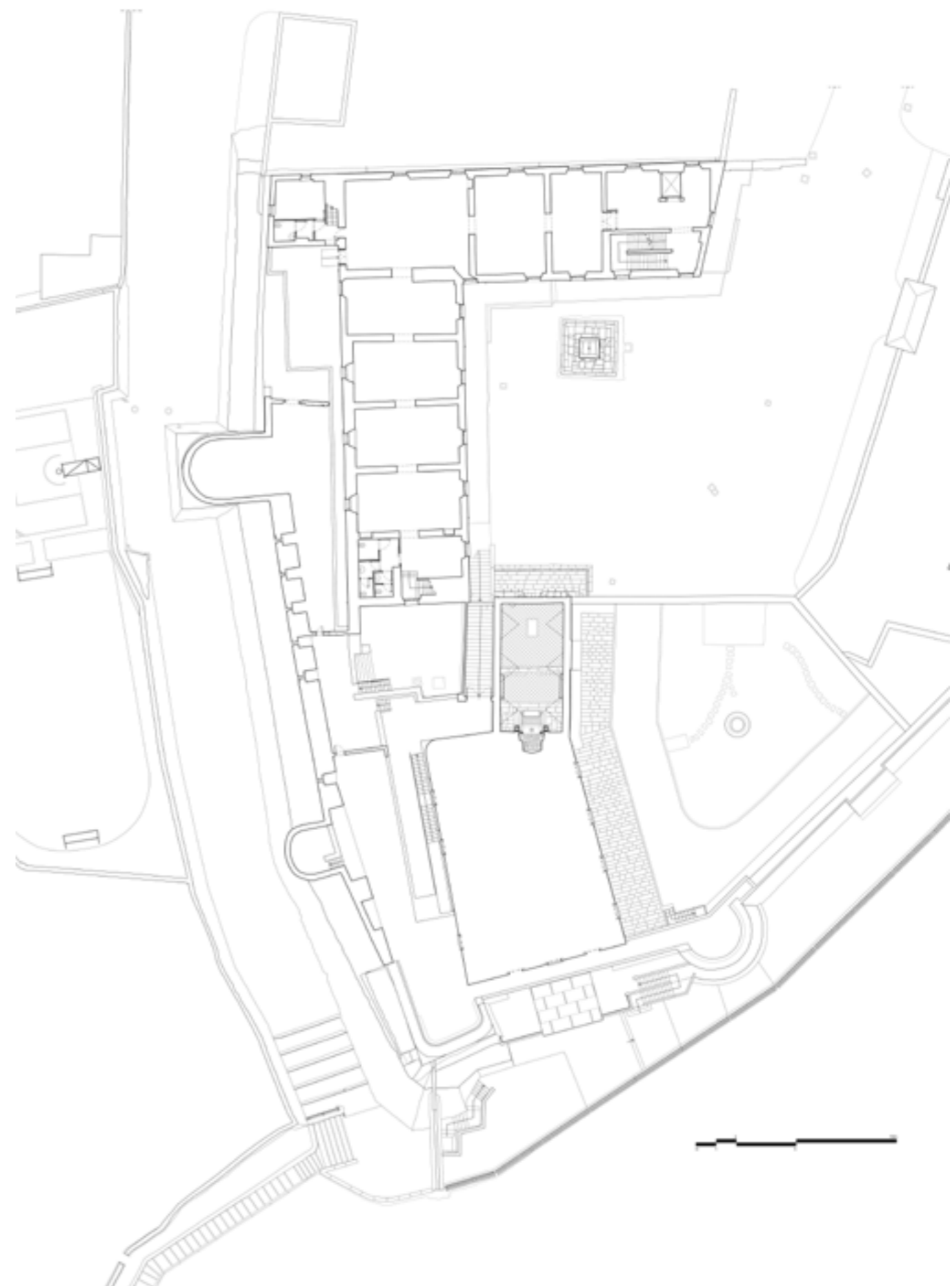
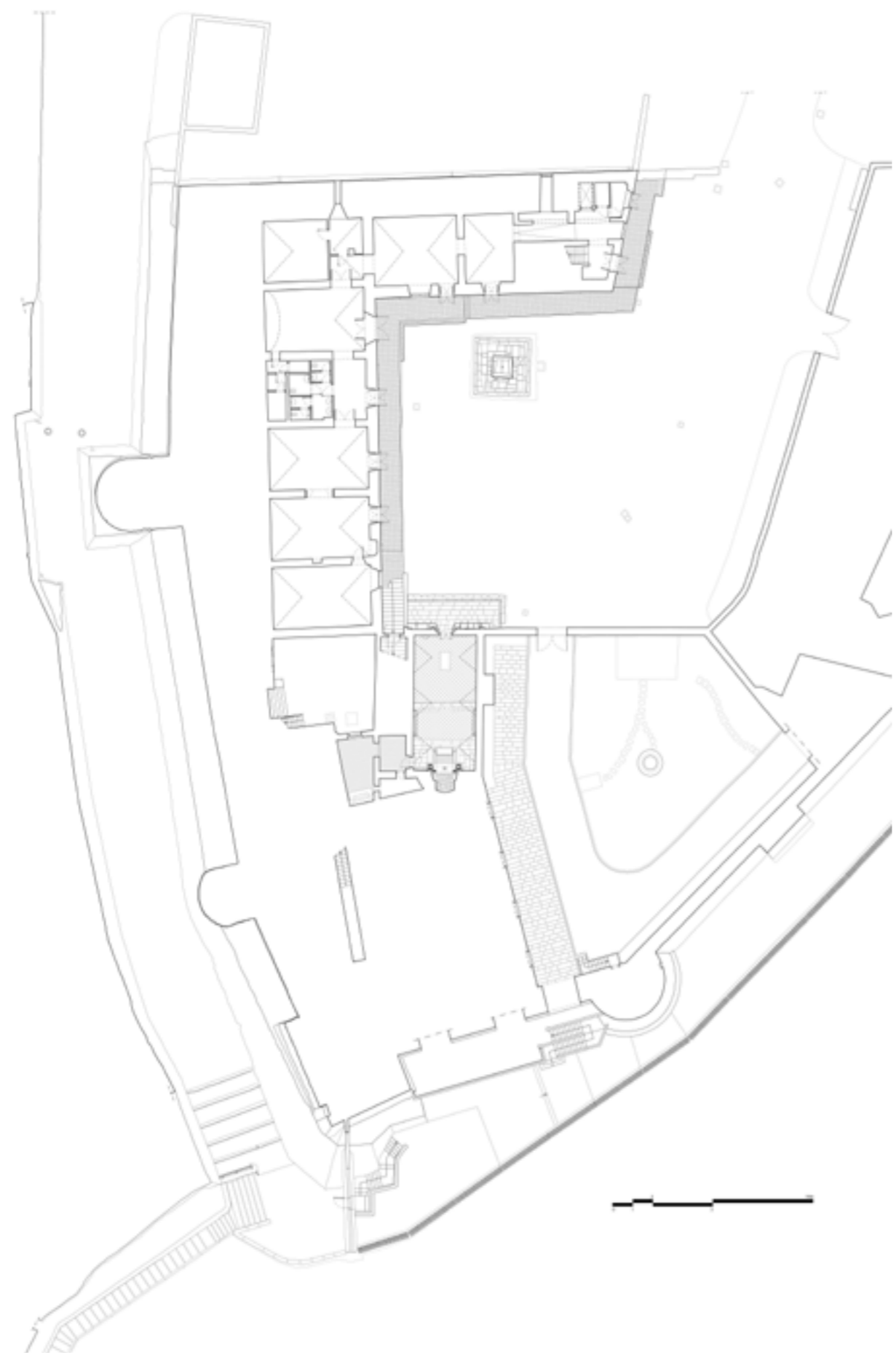




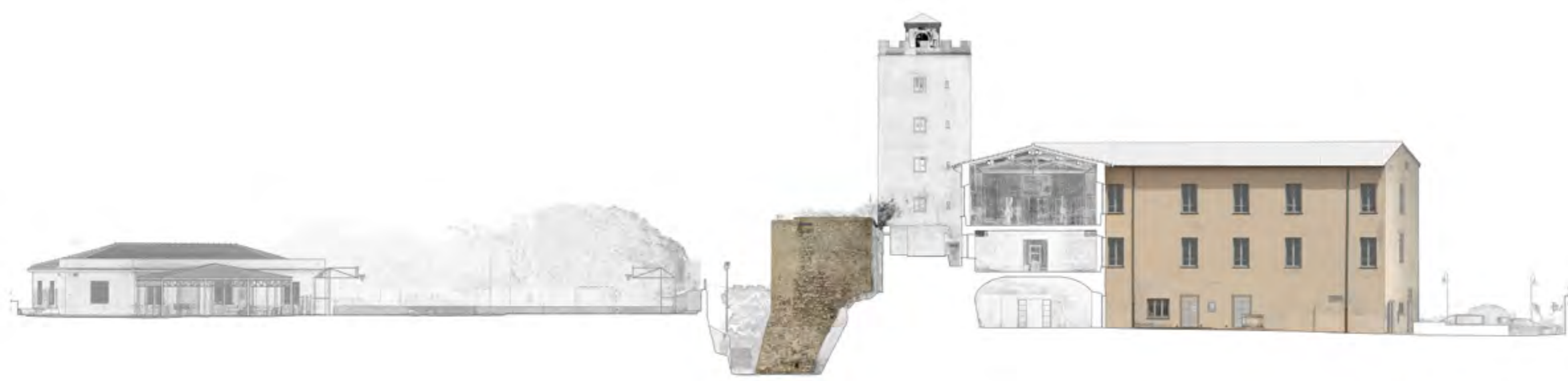
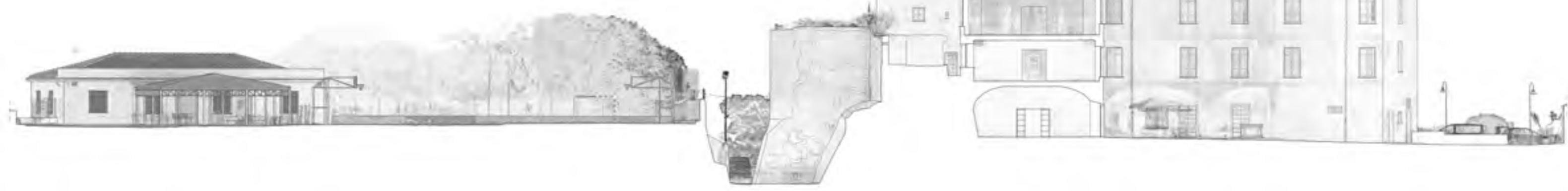
LA CITTADELLA APPIANI



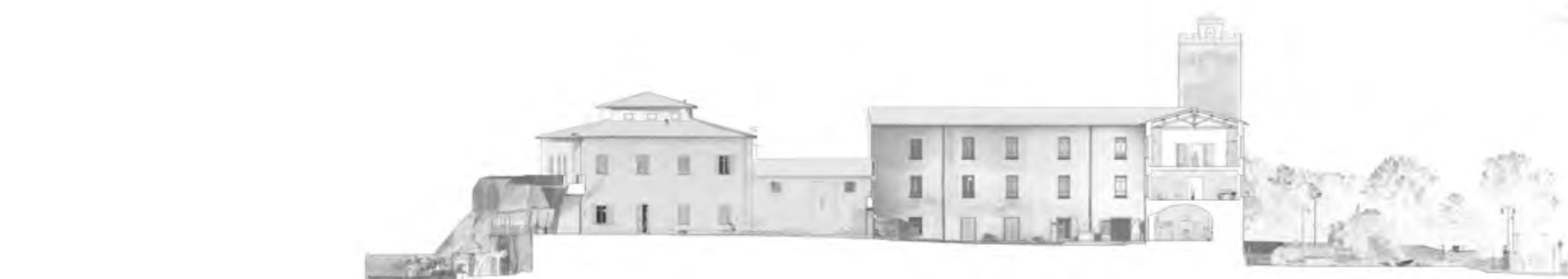








SEZIONE AA'
0 2 4 6 8 10m



SEZIONE BB' NUVOLA DI PUNTI
0 2 4 6 8 10m

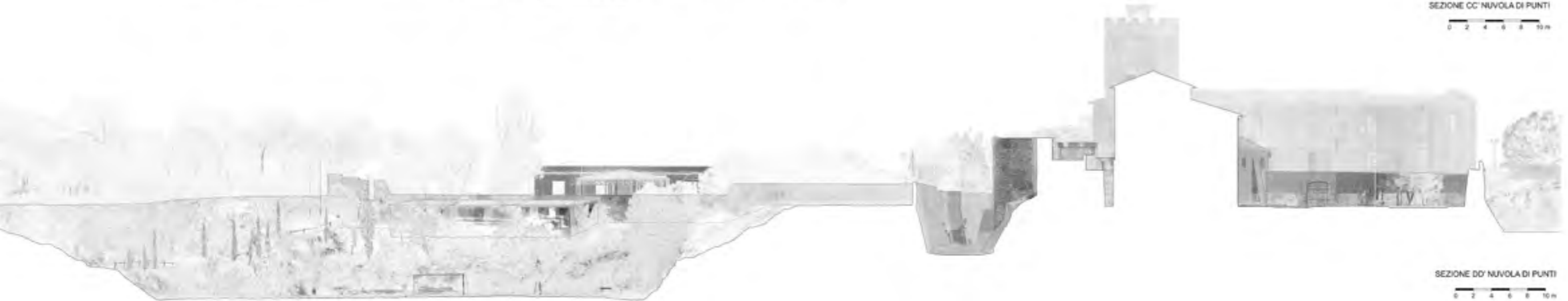


SEZIONE BB' FOTOPIANO
0 2 4 6 8 10m



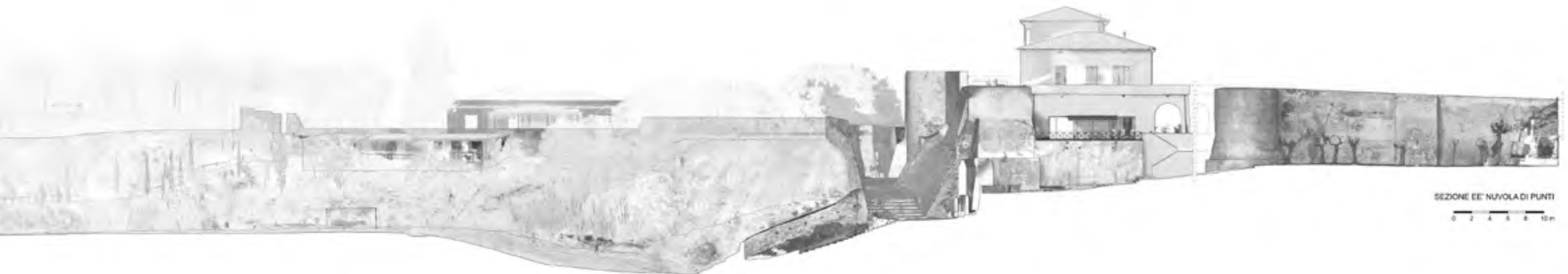
SEZIONE CC' NUVOLA DI PUNTI

0 2 4 6 8 10m



SEZIONE DD' NUVOLA DI PUNTI

0 2 4 6 8 10m



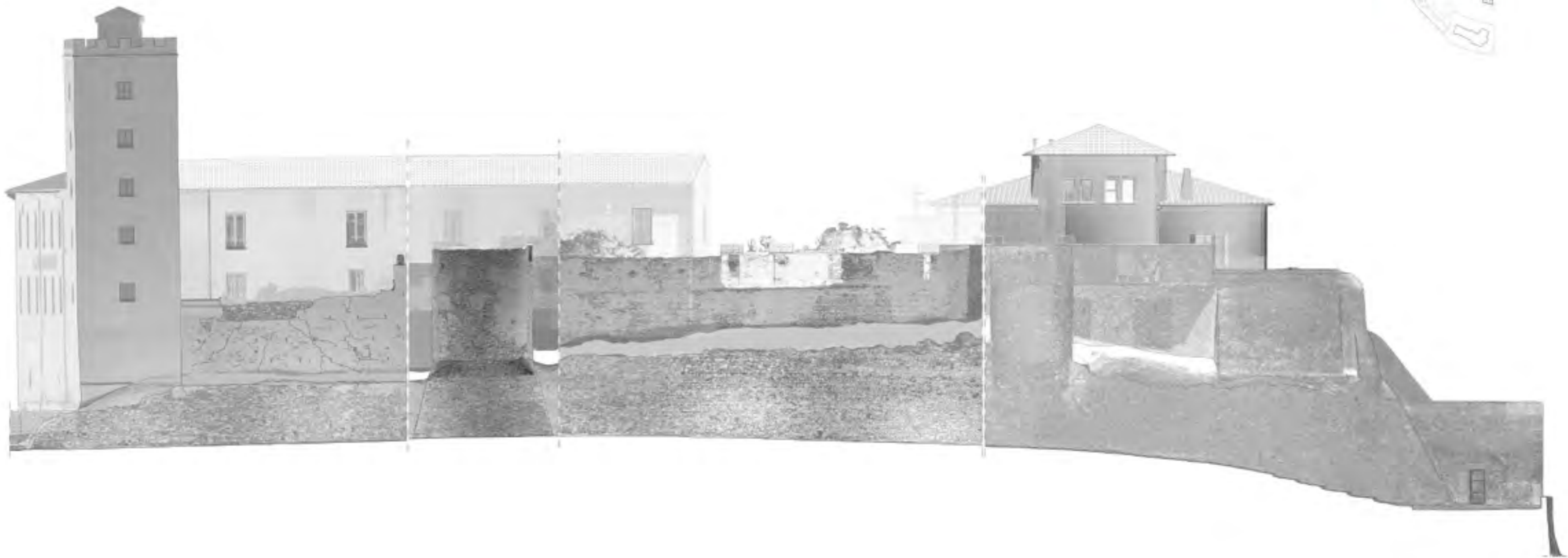
SEZIONE EE' NUVOLA DI PUNTI

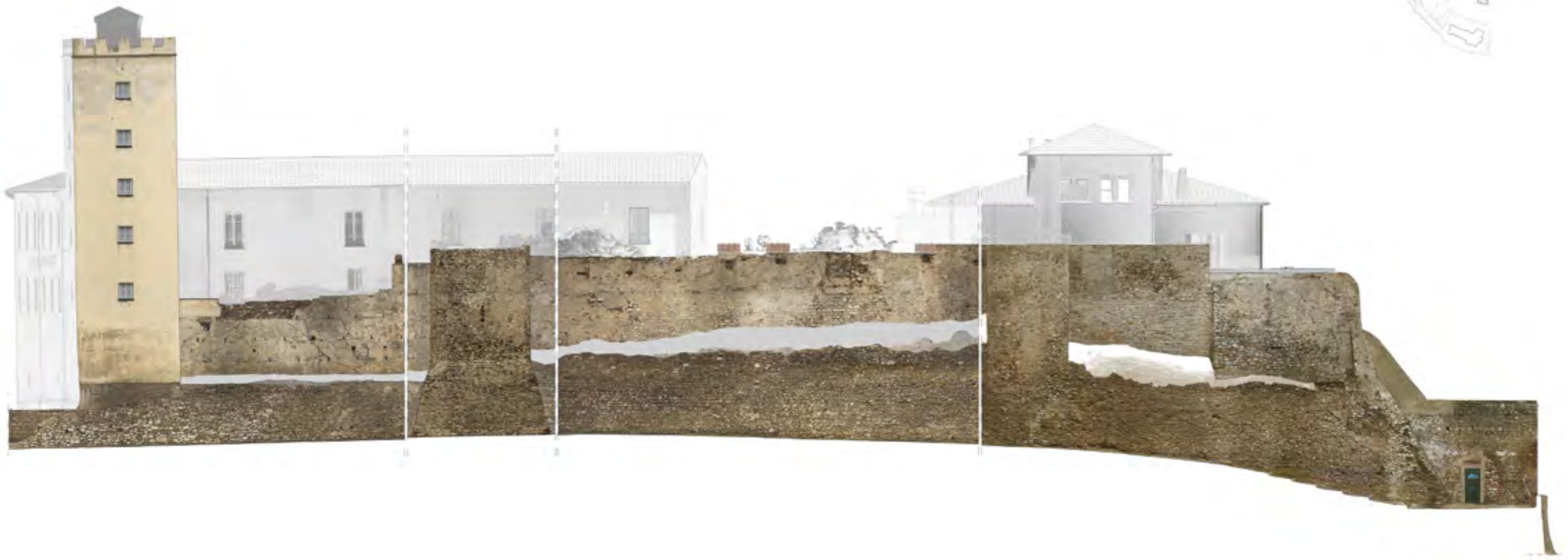
0 2 4 6 8 10m



SEZIONE FF' FILOFERRO

0 2 4 6 8 10 m



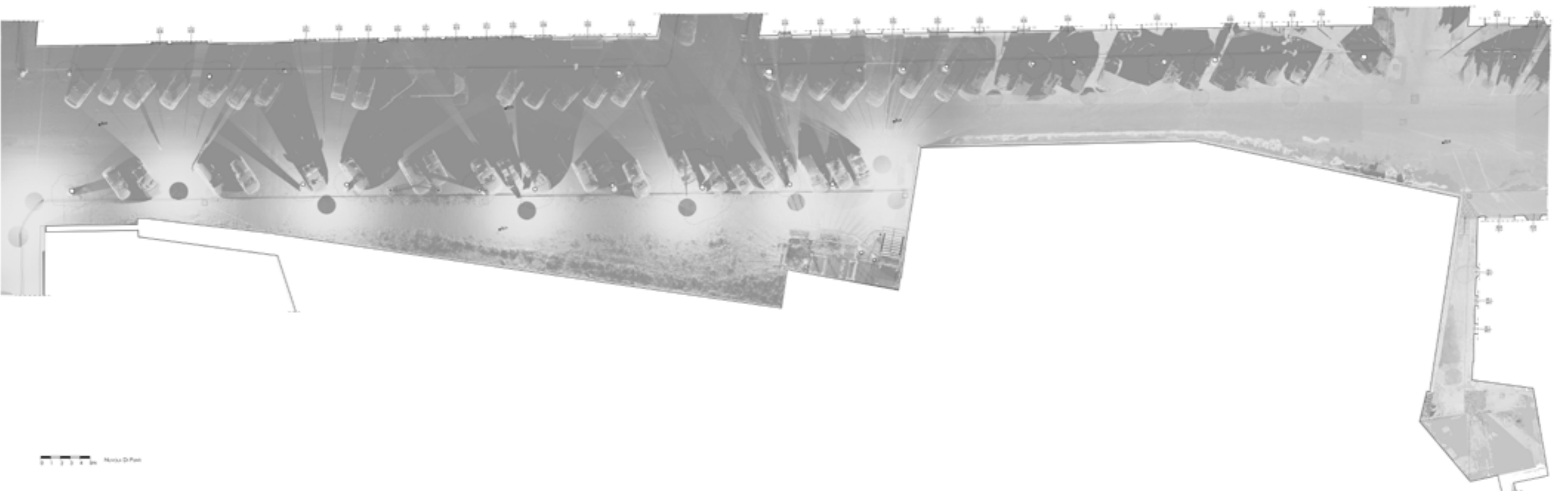
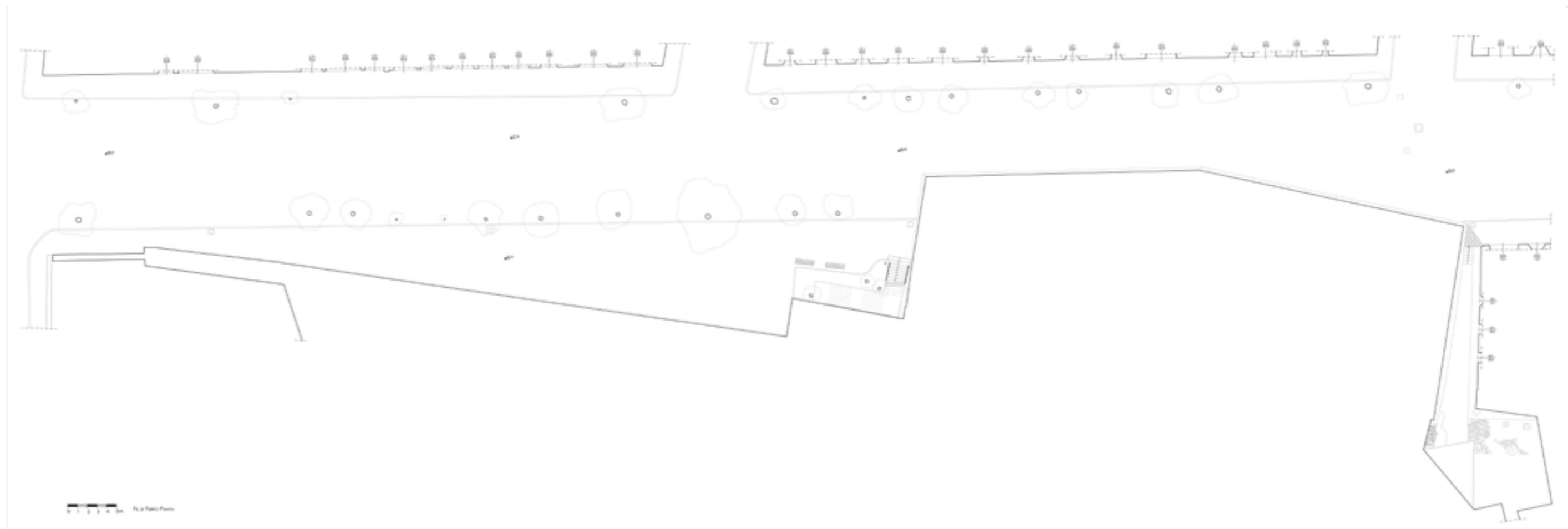


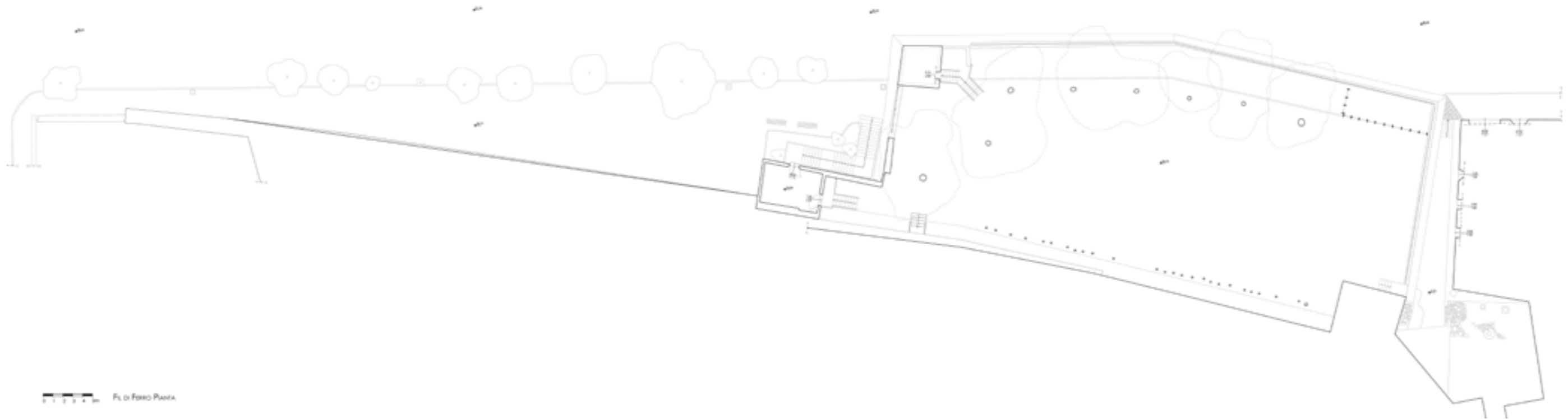
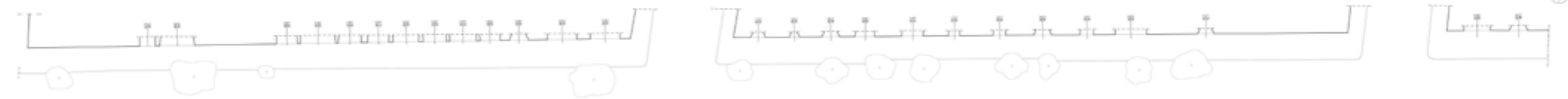
SEZIONE FF' FOTOPIANO

0 2 4 6 8 10 m

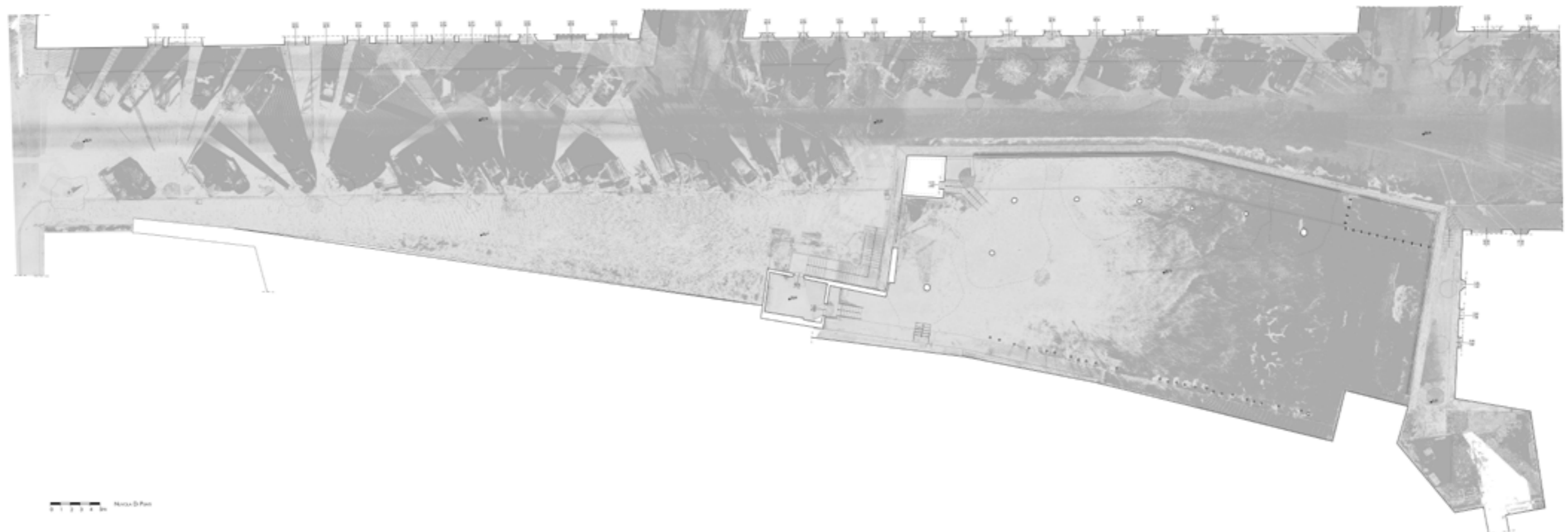


IL TRATTO DI MURA OCCIDENTALE
E
LA PIATTAFORMA DI NANNI UNGARO



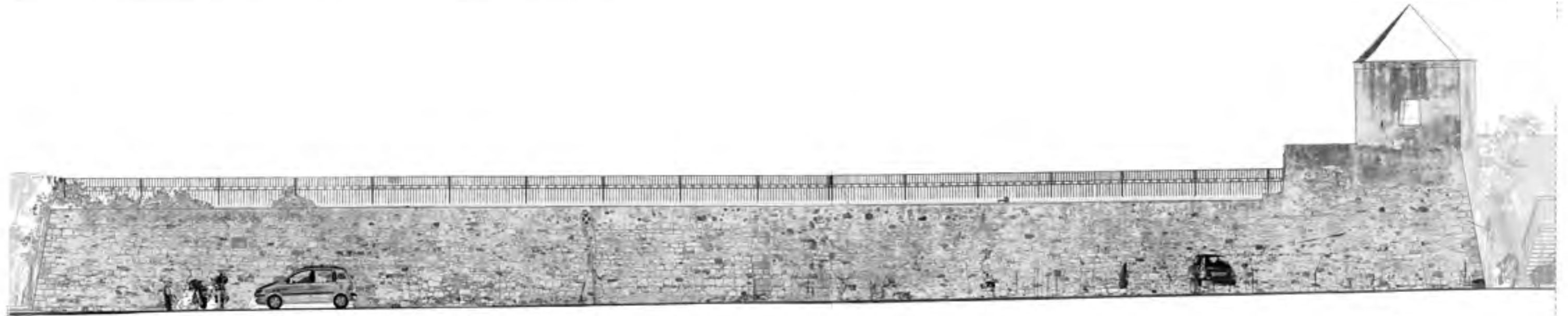
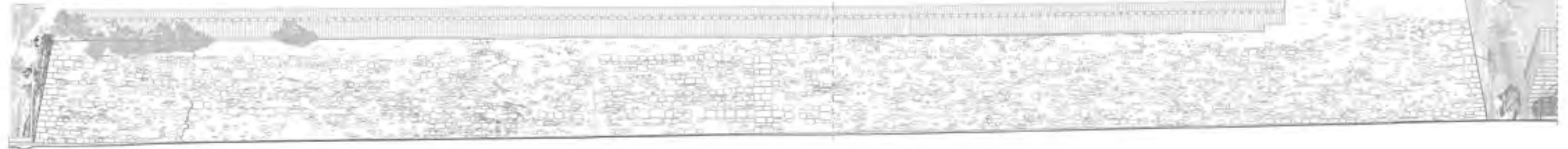


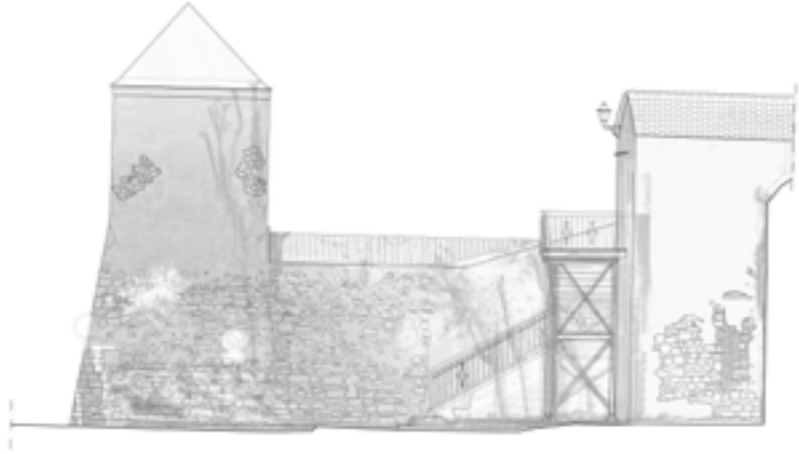
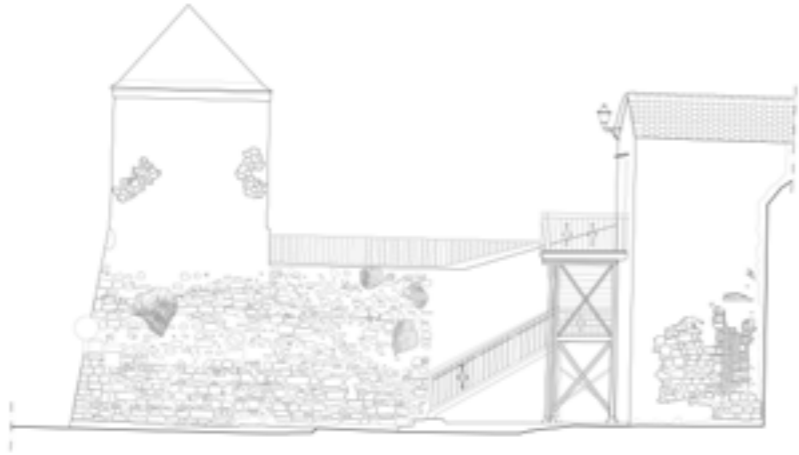
0 1 2 3 4 5 6 m Fl. di Forno Pasta



0 1 2 3 4 5 6 m Nuova Piazza



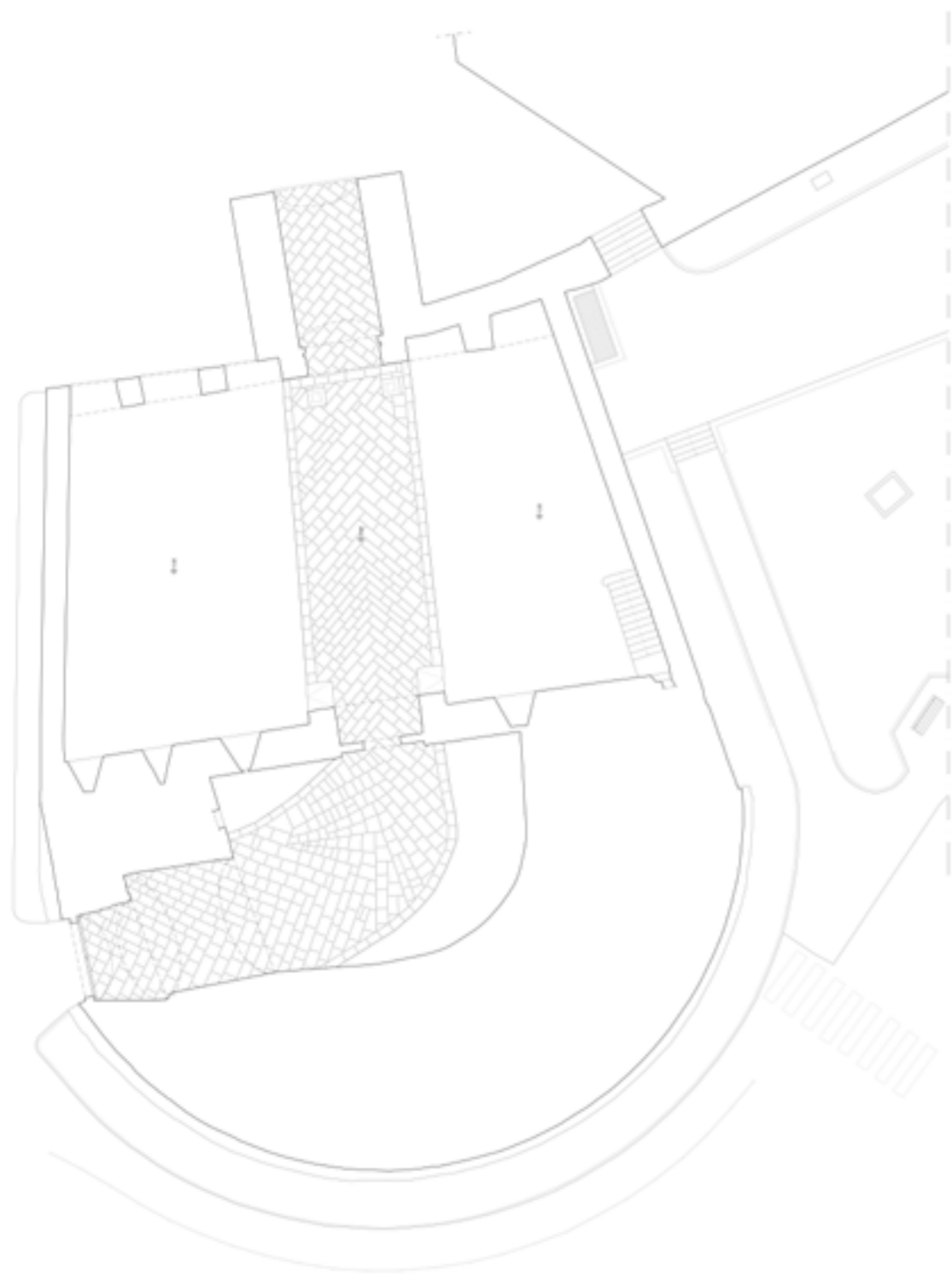


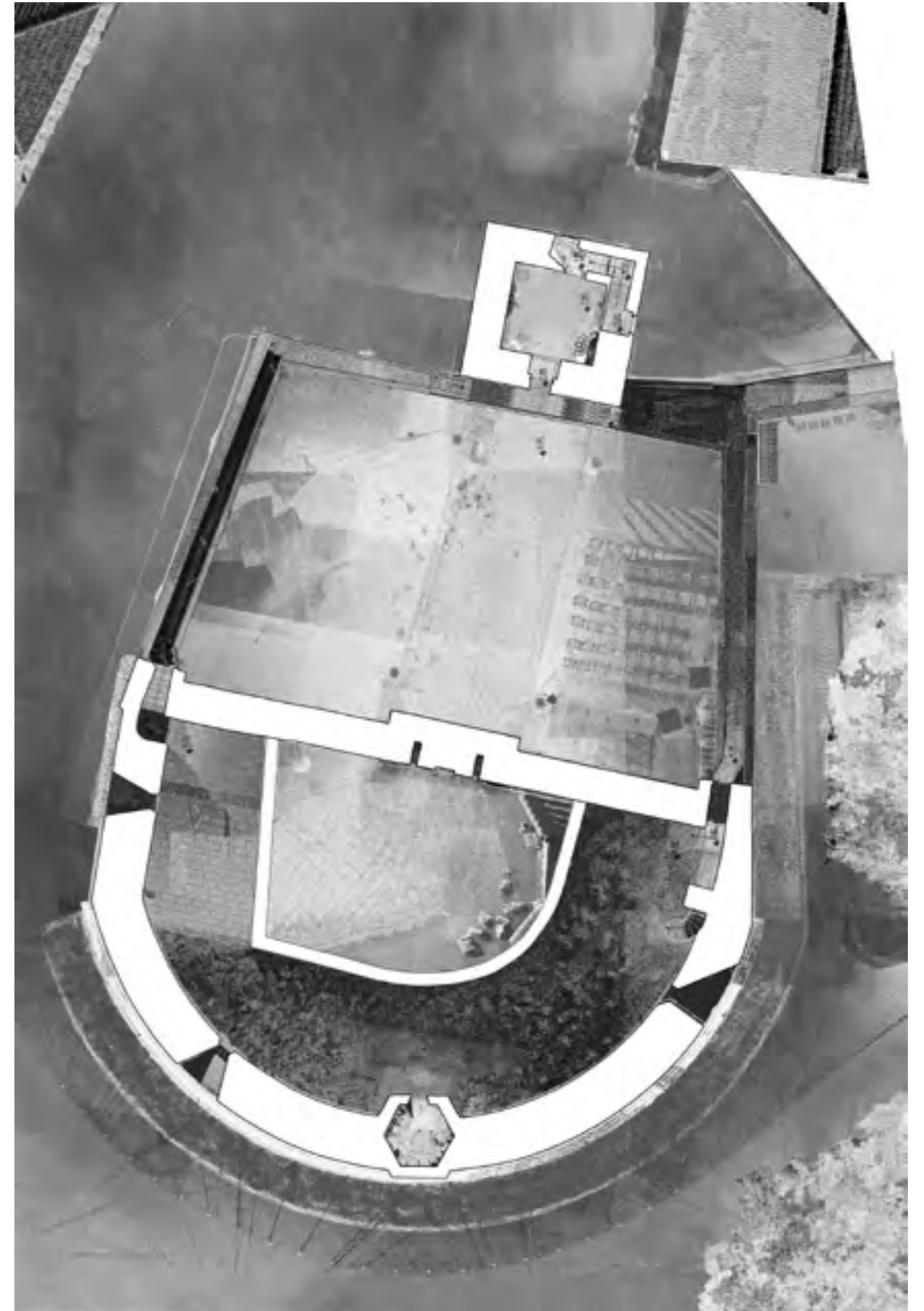
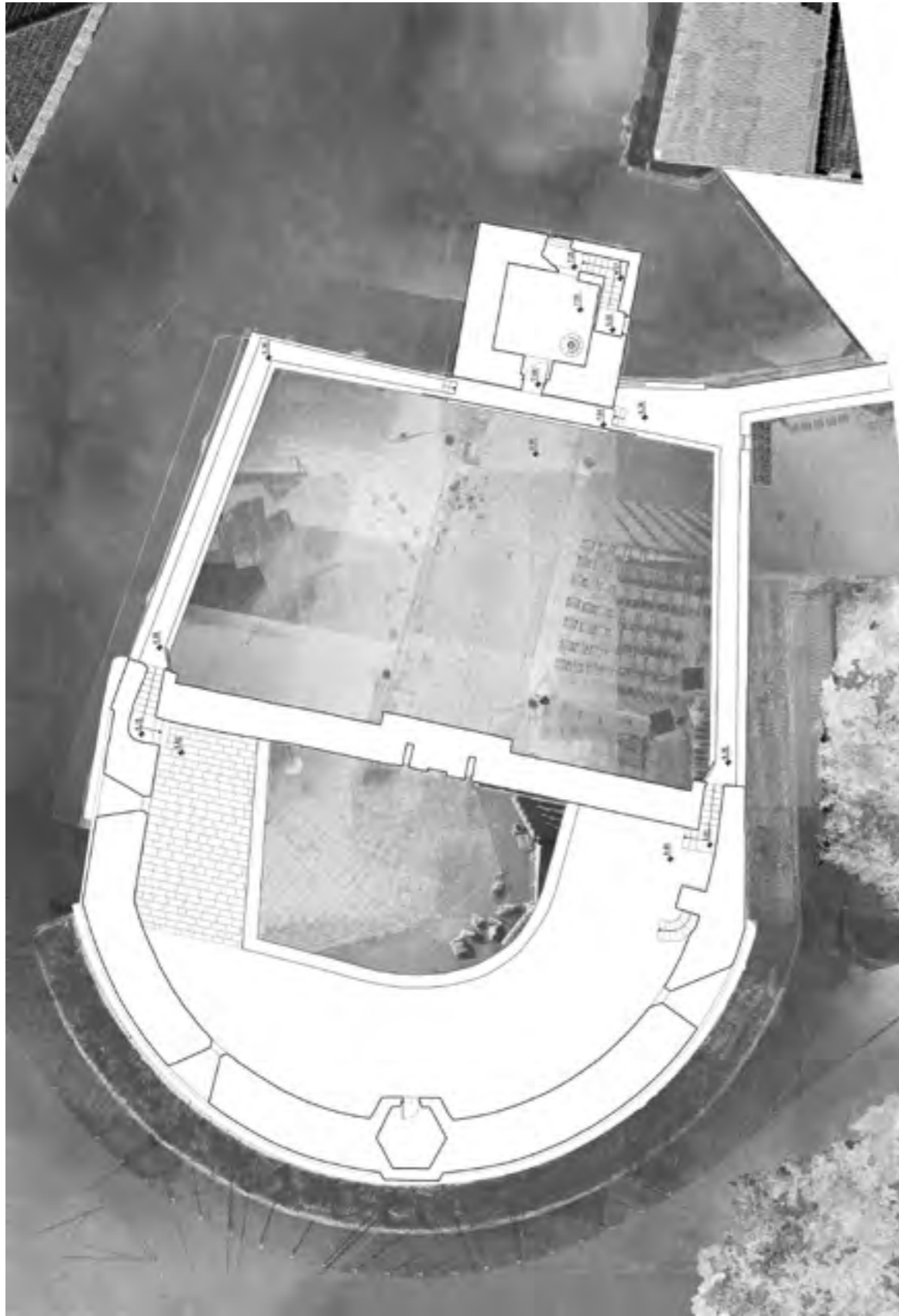


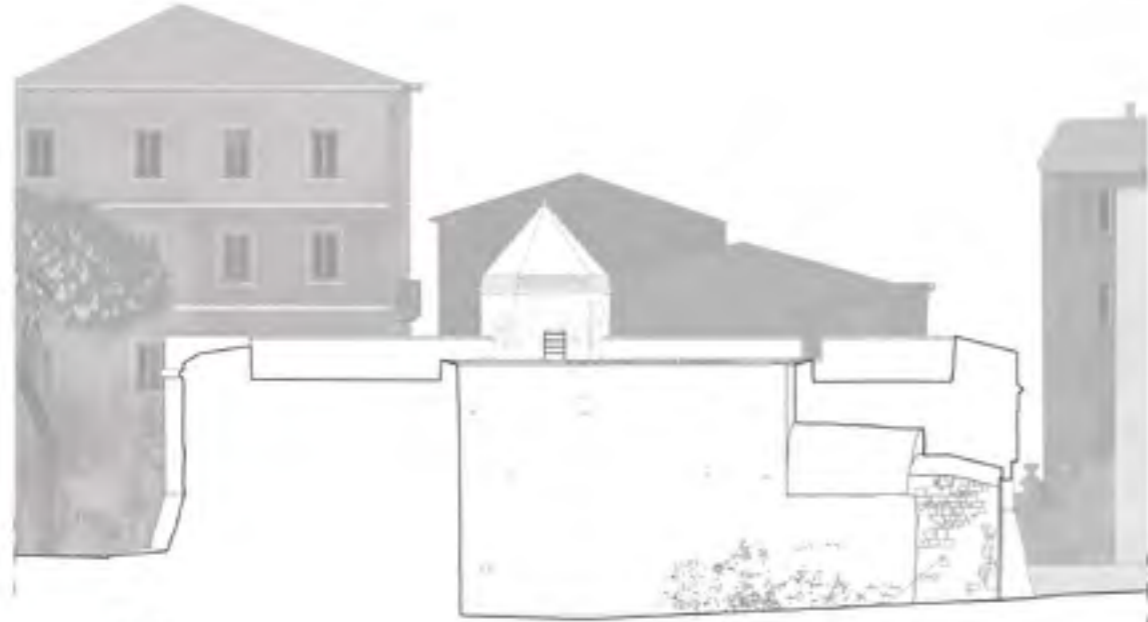
IL RIVELLINO DELLA PORTA DI TERRA











Sezione BB'



Sezione CC'



Sezione BB'



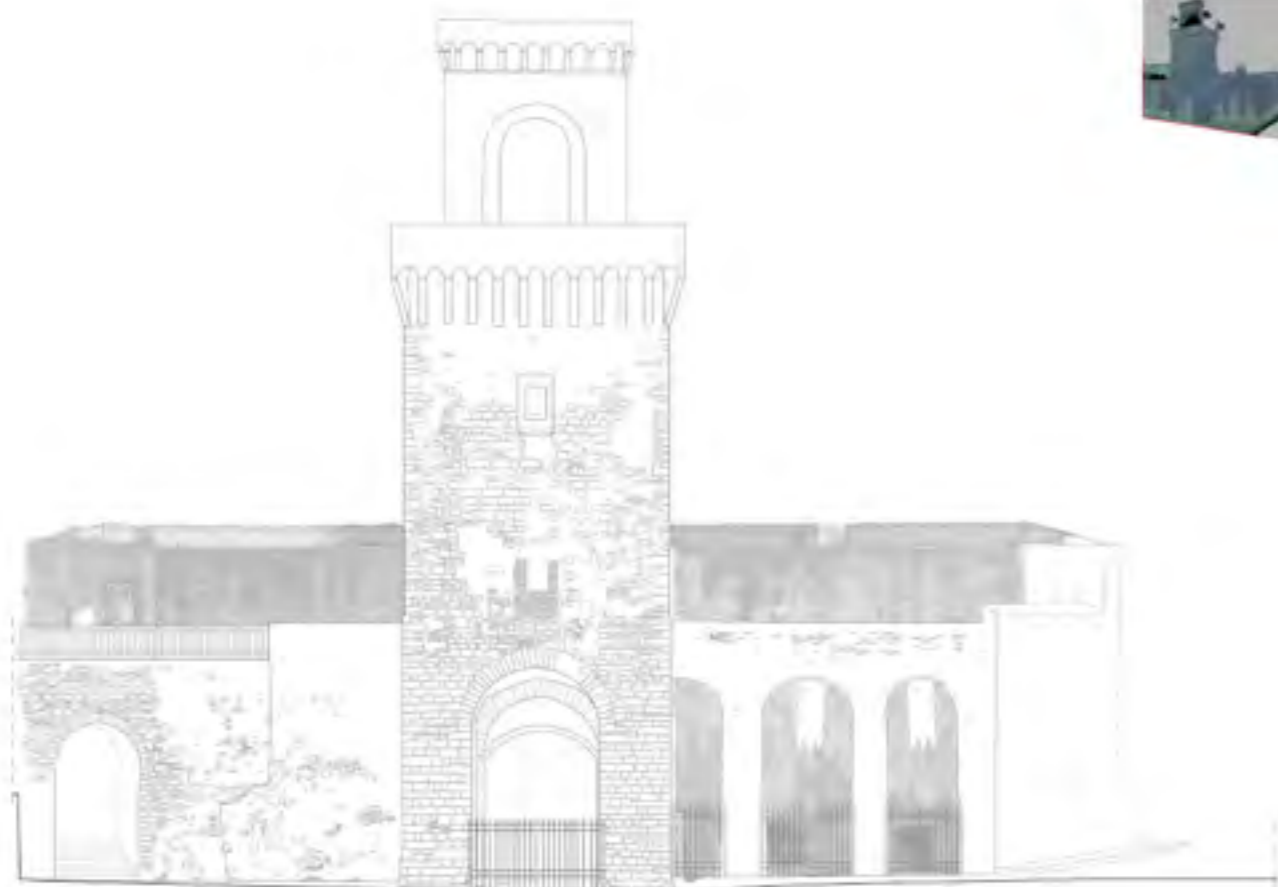
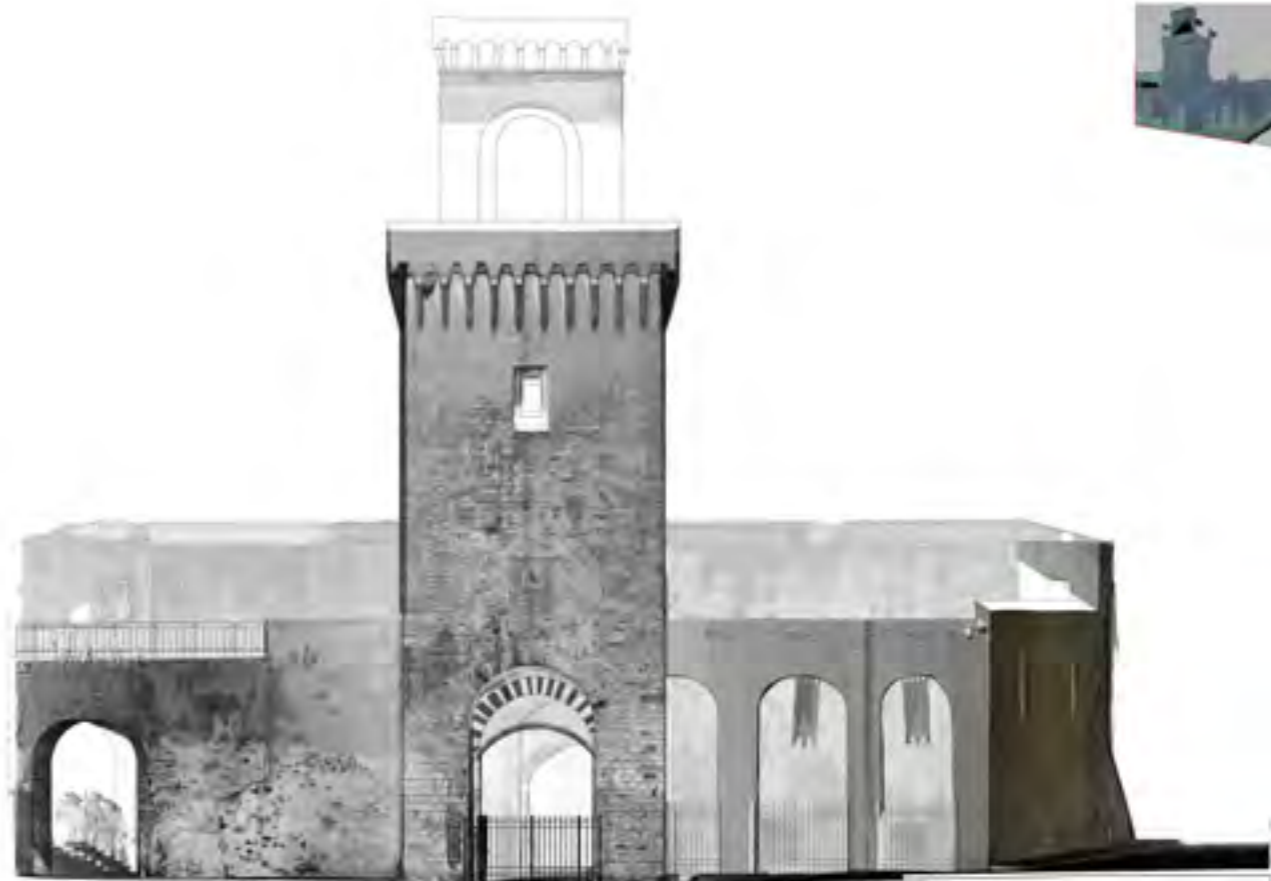
Sezione CC'

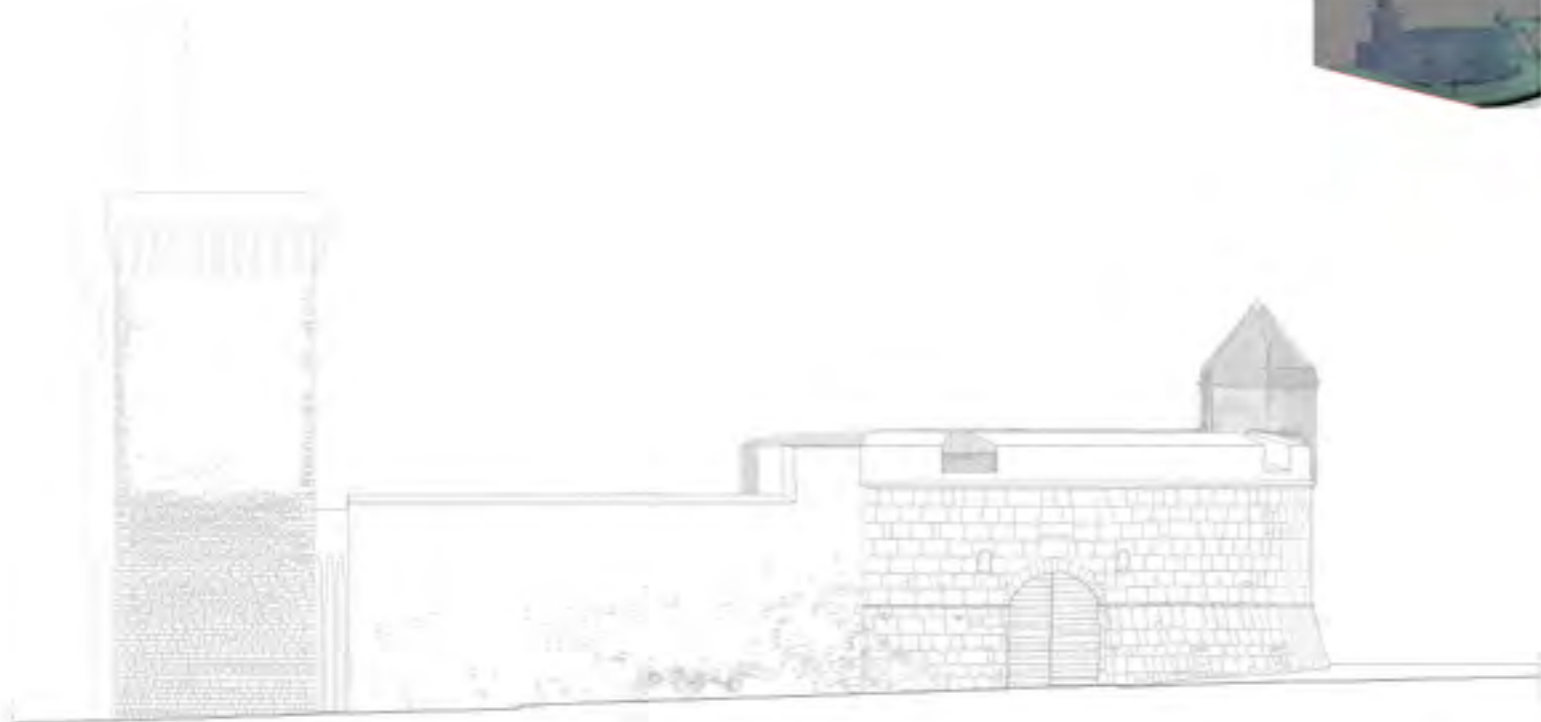
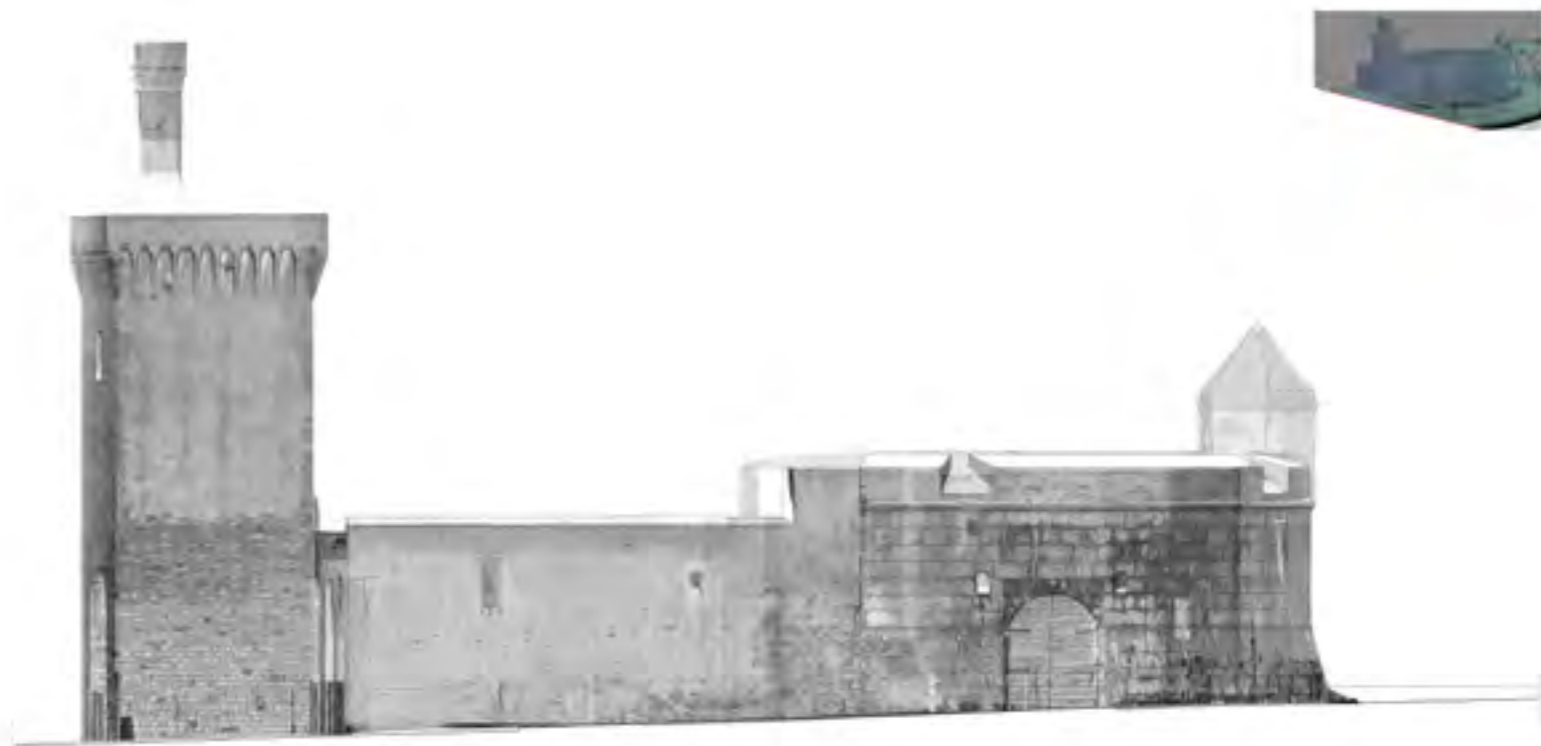


SEZIONE AA'

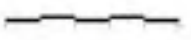
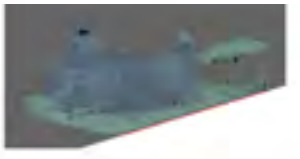
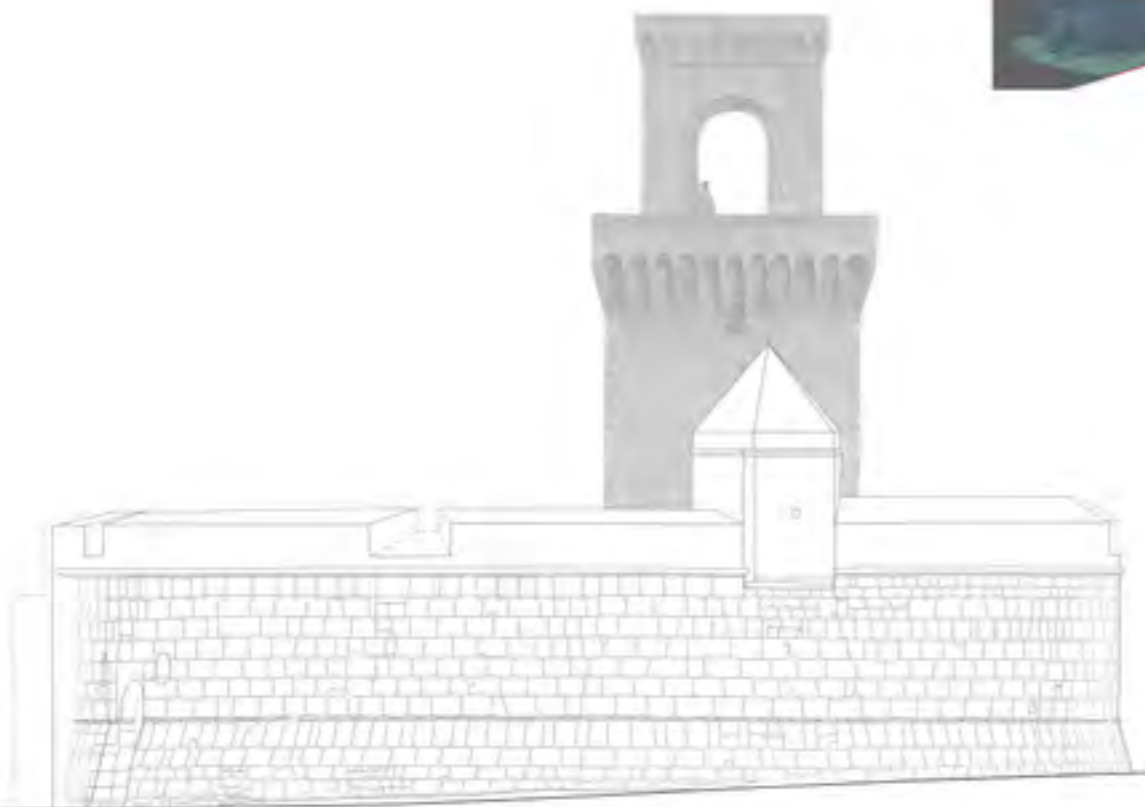
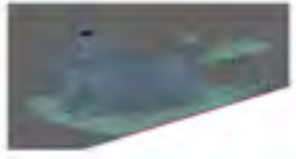
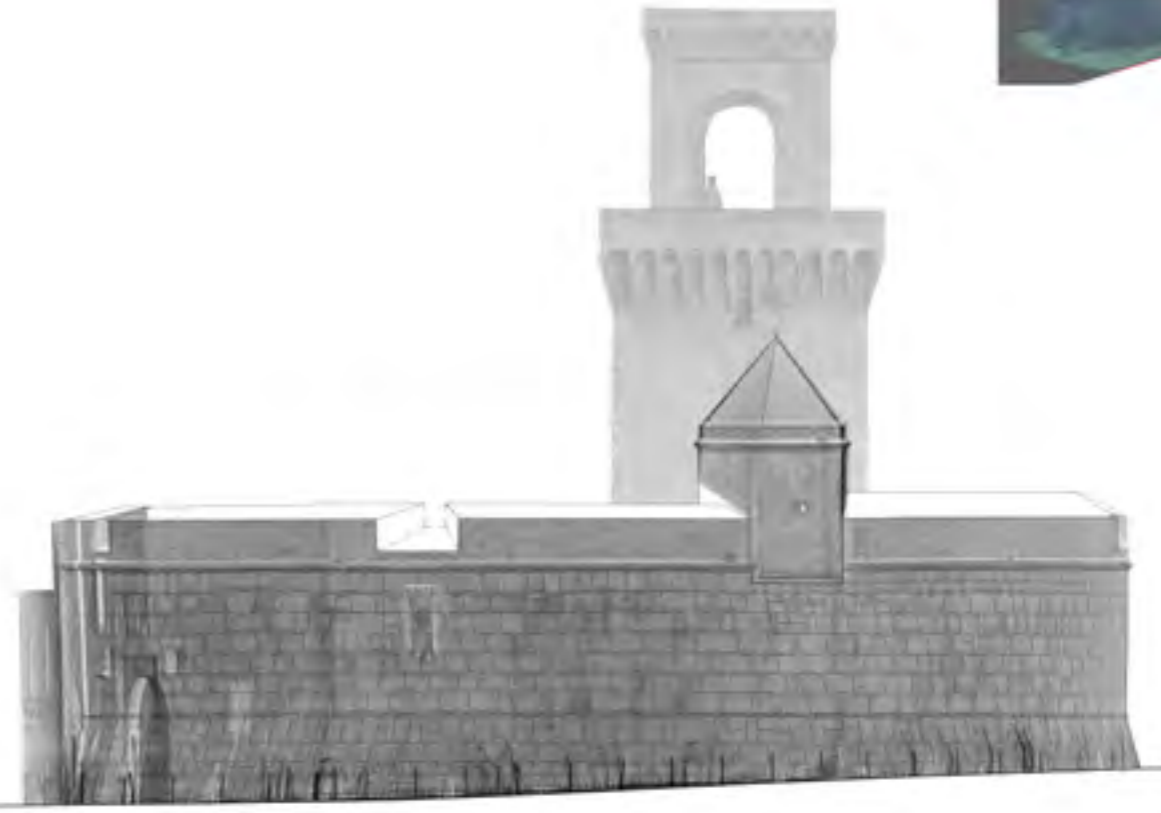
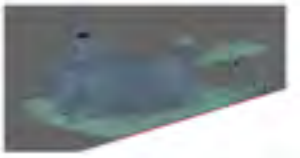


SEZIONE AA*









CAPITOLO 8 Il codice II di Madrid, schede di allineamento

Il Codice II di Madrid, come è stato descritto nel paragrafo dedicato alla descrizione dell'intervento leonardesco, contiene numerosi elaborati grafici che sono riferiti alle architetture di Piombino: si tratta di numerosi schizzi planimetrici, eseguiti sia con il fine di rilevare lo stato di fatto delle fortificazioni sia con l'intento di illustrare un progetto di potenziamento delle difese. Per chiarire ed illustrare graficamente a cosa si riferiscano i disegni descritti in precedenza sono state progettate le schede seguenti in cui foglio per foglio si estrapolano i disegni di Leonardo da testo e si tenta di allinearli sui rilievi eseguiti di Piombino. Nella maggior parte dei casi è stata utilizzata come base per l'allineamento la planimetria generale estratta con la nuvola di punti: molti dei disegni infatti preparati da Leonardo non sono dettagliati a livello architettonico ma riguardano la distribuzione delle strutture difensive in rapporto al sistema fortificato della città di Piombino e sono esse stesse disegnate a scala urbana. In questi casi è evidente come i disegni di Leonardo siano preparatori, non definitivi e spesso fortemente non proporzionati rispetto alla reale morfologia delle architetture, come si può vedere dalla scheda del foglio 6r. In cui il cassero viene rappresentato nelle sue componenti medievali, però è fuori proporzione così come i profili del Rivellino e del promontorio sud: questi problemi legati alla natura del disegno veloce, utile alla rapida esecuzione di un'idea o di una documentazione, ma privi di alcuna precisione metrica hanno fuorviato le analisi di alcuni storici portando a supporre alcune idee prive di fondamento¹. I segni con cui Leonardo rappresenta le strutture della città sono comunque, seppur molto sintetici, utili a comprendere le strutture disegnate, e soprattutto nel caso degli elaborati di rilievo, sia a vista che per i rilievi metrici eseguiti al foglio 134v, a verificare lo stato di fatto delle strutture presenti sul territorio di Piombino nel 1504.

È stato utile inoltre ricorrere ad elaborati più di dettaglio in alcune occasioni, specialmente nel caso del progetto della cittadella Appiani, che Leonardo ha analizzato a scala di dettaglio architettonico: le rappresentazioni del codice

di Madrid infatti sono composte da planimetrie e sezioni verticali che possono essere paragonate al rilievo eseguito con gli strumenti digitali. Questa analisi è stata in particolare svolta per il rilievo della cittadella eseguito al foglio 134v.; per il rilievo del fronte della cittadella, in cui Leonardo progetta la torre circolare, in cui si vedono interessanti strutture che permettono di comprendere lo stato di fatto della cittadella nel 1054; nel disegno del puntone progettato di fronte ad un torrione ellissoidale; nella sezione verticale che rappresenta il progetto dello spalto del poggio di Santa Maria.

Alcuni dei disegni effettuati da Leonardo difficilmente possono essere paragonati a rilievi dell'esistente poiché rappresentano schemi, come la divisione interna del cassero, o viste progettuali, come nel caso del Rivellino circolare di fronte al cassero, che oggi non sono più confrontabili. In questi casi le schede si limitano alla descrizione degli elementi rappresentati nei disegni in modo da chiarire le architetture viste da Leonardo.

Di ciascun foglio è stata inoltre allegata la trascrizione dei testi, a volte utile, in rari casi, a comprendere di cosa si tratta l'edificio rappresentato, spesso invece testimone dell'utilizzo del manoscritto come quaderno di appunti utilizzato per molteplici scopi.

In sintesi si sono utilizzati i rilievi per far emergere la Piombino che vide Leonardo sulla base morfologica delle strutture che sono rimaste oggi visibili e che sono state oggetto del rilievo digitale

Sono infine riportate quelle pagine del codice che trattano argomenti legati a Piombino, con la trascrizione dei testi, e quelle pagine di architettura militari che sono state realizzate copiando rapidamente una seconda versione del trattato di Francesco di Giorgio che Leonardo studia per eseguire i progetti di architettura fortificata.

Note

¹ la esagerata proporzione del disegni ha portato ad esempio a ipotizzare che Leonardo avesse progettato delle strutture in mare, un porto nuovo nel settore orientale della città.



F. 6r

progetto per il cassero pisano: in planimetria ed in vista aerea viene rappresentato il cassero e la cortina muraria che lo collega al rivellino; avanzata nel fossato una torre/rivellino circolare a difesa del cassero, rettificando il fosso.

Sottosopra a gran mercato, le 2720 canne montano di cavatura lire 32640 cioè ducati 4662 e 6/7, senza il cavo de' fondamenti della forteza, che van sotto una canna e llargo una canna e mezzo, il meno, che son 240 canne o poco meno, che a 5 lire la canna son lire 1200, cioè ducati 171 3/7, che giunto con ducati 4662 e 6/7 fanno

[figura]

Ducati 4834 2/7. Ecco poi i muri de' fossi e pilastri arcati, che stanno sotto i muri della predetta forteza, de' quali non fo' mentione.



rilievo a vista dello stato di fatto delle difese orientali: il cassero non è proporzionato bene rispetto alle distanze



Pianta del cassero e progetto per la realizzazione di corridoi sopraelevati: le fondazioni dei muri progettati saranno realizzate ad arco rovescio

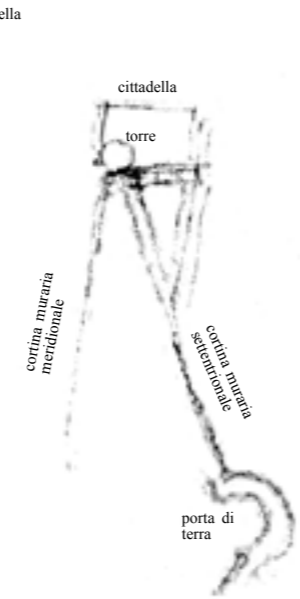


F. 15r

Le trascrizioni a penna dei primi due disegni planimetrici riguardano i nomi delle località delle le zone intorno a Signa, niente di collegato a Piombino.

(prima figura)
Signa, Pescaia, La Lastra, Pont'a Signa

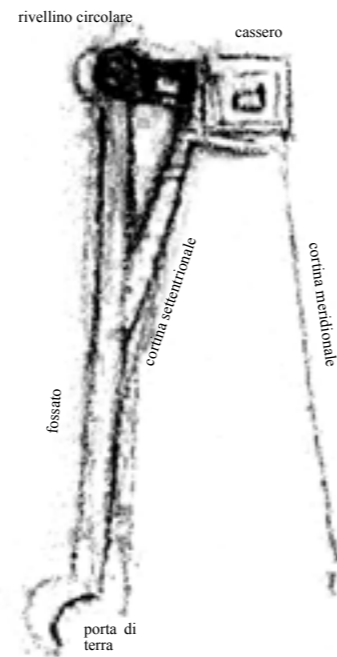
(seconda figura)
Onbrone, Golfolina, Pini, Brucianese, Monisterio, Pescaia, Fornaci, Capraia, Montelupo



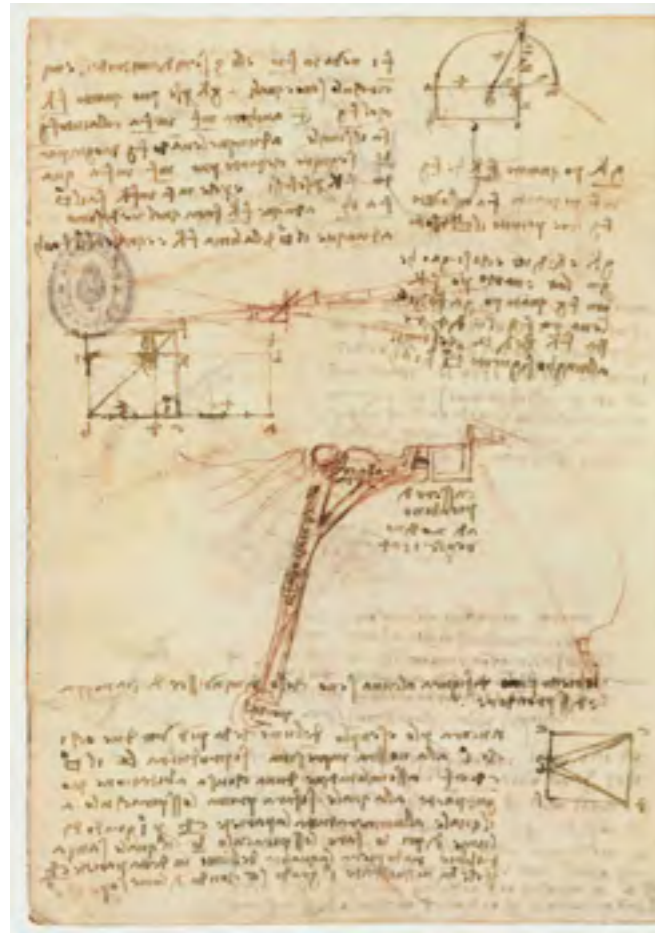
Progetto di torrione circolare per la cittadella Appiani e collegamento murario con il rivellino di Rinaldo



F. 21v



Facetia dell'arciprete di Sancta Maria del Monte, che sta a Varese, che ffu manfato legato al Duca 'n scambio d'uno sparviere.



G K pò qunato f K e f g in f pò qinato f a coll'aiuto f g, cioè pò tutto il quadrato di sotto.

f i ne va in fm, e lli 3 semidiametri del semicirculo sono equali. g K per sè può quanto f K con gf. E ancora m f in f a coll'aiuto di f g fa il simile. Adunque levando f g da ogni parte, seguirà che tanto può m f in f a, quanto f K per sè stessi. E perchè m f in f K fa il quadrato f a i h adunque f K farà quel medesimo. Adunque il quadrato della Lina f K è equale al quadrato f a i h.

g K è radice di 16 e così g a e g m. E ttanto po f K con f g, qunato pò g K, radice di 16. Leva f g, radice di 4 resta f K, radice di 12, ch'è simile al lingo figurato quadrato f i a h.

Cassero di Pionbino a di 20 Novembre 1504/ strada coperta/ il fosso che io drizo/ porta.

L'obietto di figura alcuna se non llo diminuisce di chiarezza e de ssprendore. Ancora per lo esemplo del lume che dà più due ochi che uno alla nostra inpressiva. Si produrrà il quadrato c d e f, a ssimilitudine d'una chiusa abitazione da ogni parte. Alla quale si farà prima lo sspiraculo a. Il quale allumerà tutta la parete c d per un grado di lume. Di poi io farò lo sspiraculo b, il quale senza dubbio radopierà la qualità del lime in detta parete c d, perchè ha aquisstato un grado secondi di lume sopra al primo.





Addi ultimo di novembre per Ognisanti 1504 feci in Piombino al signore tale dimosstratione.

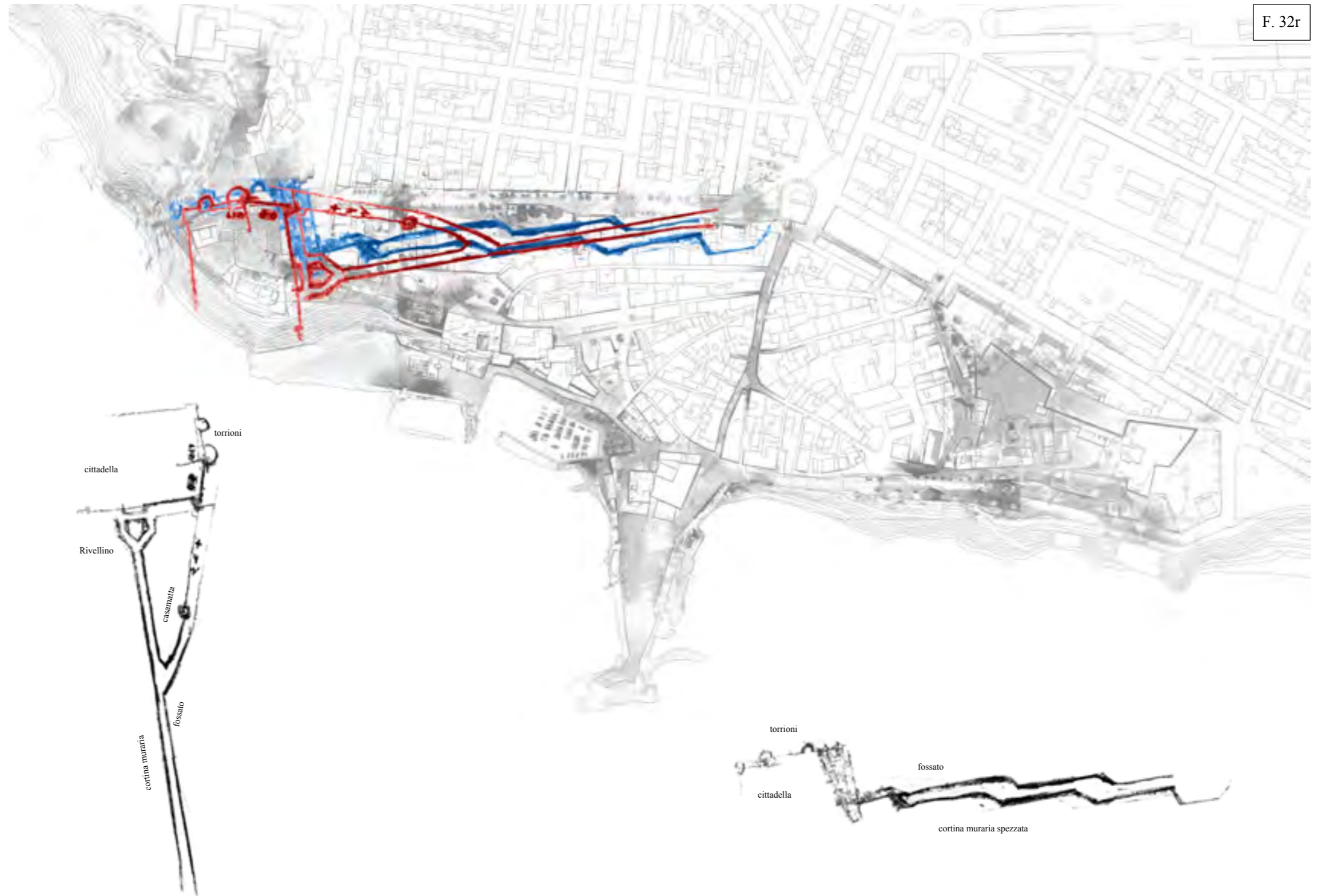
Tenebre è privation di luce. Onbra è alleviamento di luce. E non si dà tenebre in loco che abbia alcuna esalation d'aria

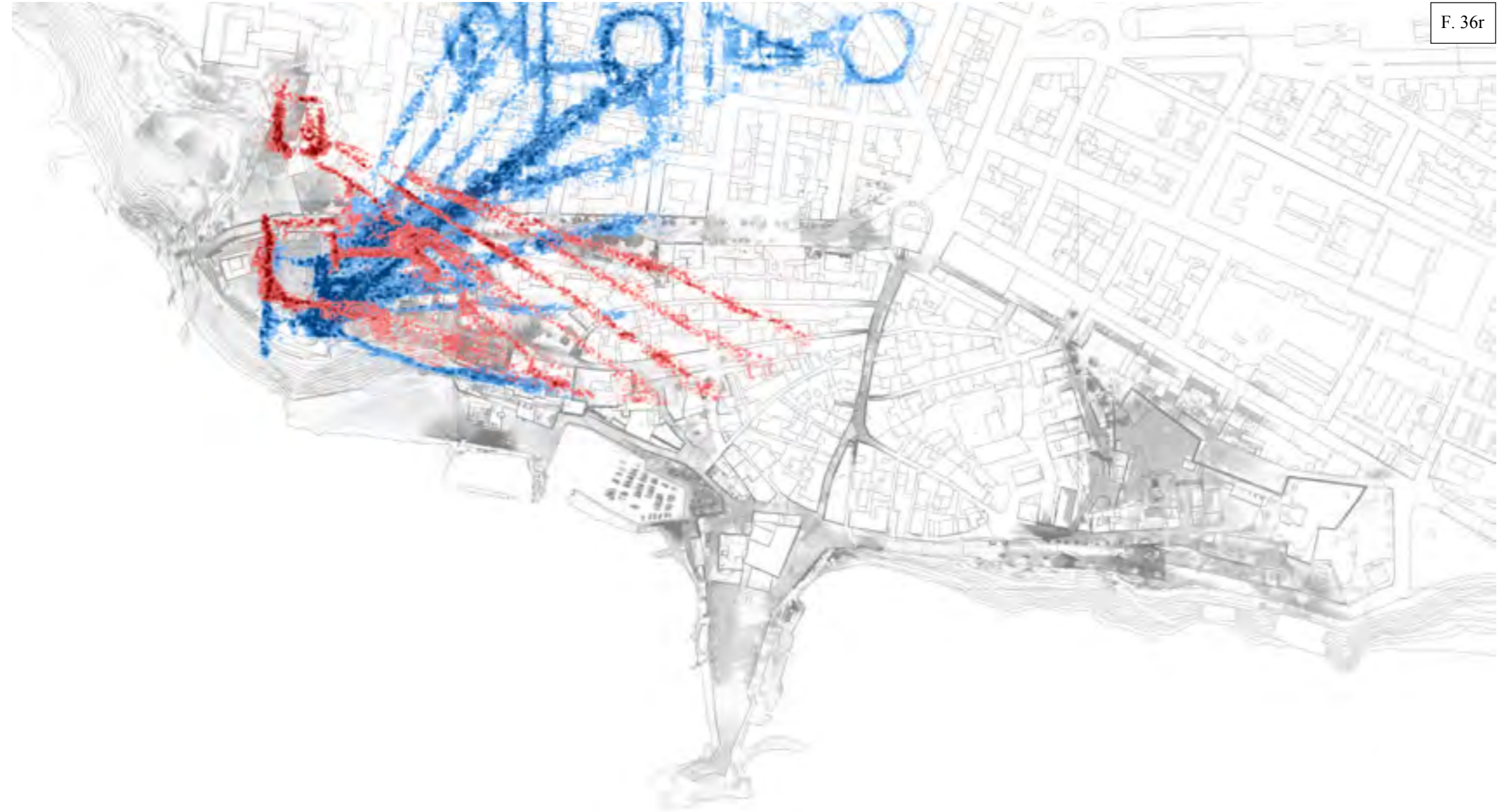
No' noce all'ochio avere più luce quadrata o llunga che ttonda, inperochè per utta e in [vi]rtù di ricevere le sspetie delli obietti contraposti. E che sie vero che tta[l] forma non dia [n]foia, sia guardata una cosa infra lli labri delli coperchi delli ochi quasi serrati, che resisterà quasi la figura della luce in nella figurata forma e non varia i' prospettiva.

La gatta per vedere e uldire ha lo primi sensi che infra lli animali si trova. E l'odorato è cquasi simili alli predetti sensi. E dove li manca la potentia visiva, essa socorre con l'auldito, il quale sempre sta collo orecchio parato, a uso d'inbuto, a ricevere le impressione delli strepiti fatti infra l'aria, e per larghe vie li manfa al comun senso. L'ochio dell'omo posto in gran lume d'aria o d'altro luminoso, risstringe la luce e lla fa di minor potentiam inde i lochi di minor luce li paian tenebrosi



F. 25r





[continua dal foglio precedente]

[...]-fondità sono braccia 210, le quali 210 moltiplicate per la lungheza del fosso, [so]n braccia 275, ne viene braccia 57750 quadrate, le quali partendole per la cana del tereno, che sson 64 braccia, ne vien canne $902 \frac{2}{6} \frac{2}{4}$, le quali son tanti ducati, quante canne, cioè ducati $902 \frac{2}{6} \frac{2}{4}$.



F. 39v



F. 40r

A b è pari al suo quadrato di sotto, cioè e f. E così c d è pari al suo quadrato g h. Adunque le parti a d dell'una figura e dell'altra sono pari alle parti di sotto e h, le quali e h giunte insieme fanno il quadrato K eguale a la superfittie m.





F. 64v



F. 79r



F. 84v

*Dell'acque.
Nessuna parte di l elemento pesa nel suo elemento, e per questo il sasso risalta infra angoli equali dopo la percussion del suo obbietto, cioè per essere fori del suo ellemento.*



Fa che nelle torri che difendano le mura per fianco, nessuna loro bombardiera sia fatta nell'altezza dell'altra. E questo fareno acio che traendo alli scalamenti, la bombardiera dell'un torrione non traga e amazzi il bombardieri della sua oposita bombardiera. Perchè tollendo i bombardieri, si toglie le difese principali.

La terra debbe essere quadrata e lla forteza nel mezo quadrata ancor lei. E da ogni angolo si parti un muro doppio, e termini nelli angoli della terra. Sotto i quali muri passino le strade della terra e ssieno piegate in tali angoli, in modo che i muri predetti possano mettere artiglieria e trarre e nettare ciasscuna stradi di sua nimici. Ciasscin de' quattro muri doppi che ssi parta da 4 angoli della forteza, deve esser scarpato e i' fosso di qua e di là. E dopo tal fossi sieno 2 strade per lo verso della lunghezza de' fossi, in modo che ttale strade sieno in loco delli argini de' detti fossi. E lle strade de' muri doppi ssi basse, ch' elle non pervenghino col loro ciglio all'alteza dell'argine, accio che l'ar[t]iglieria piantata sopra essa argine non ronpessi il muro dove esso è doppio. E ssieno tali strade con ispesi pozi e seracinessche di ferro e ponti levatoi, con porte e bombardiere accio che, sse per caso, se lli nimi- [continua al foglio92r]



F. 91v



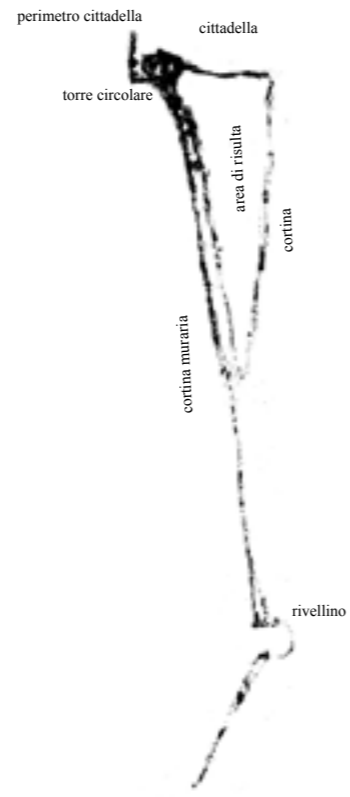
Sia fatto una lunula eguale a uno triangolo di 2 linee rette e una curva. E ancora su faci nella medesima figura uno triangolo di tre linee rette, eguale a uno triangolo di 2 linee curve e una retta.

In quanto alla prima richiesta, la lunula fatta delle parti d o e è pari in q[ua]ntità al triangolo fatto delle parti o f g, che così si prova. E prima stia fermo il triangolo o, in mezo a 4 equali portioni di cerchio, cioè d e f g. Dico adunque che sse le 2 portioni d e al triangolo, che io ho fatto la lunula d o e. E sse io tolgo esse portione d e al triangolo o e lliene rendo 2 altre simili, che io rifarò una superfite eguale alla prima predetta lunula. Adunque siale renduto le 2 portioni f g, e arò fatto il triangolo o f g eguale alla lunula o d e. E per la seconda richiesta, io leverò la portione f del triangolo rettilinio a b c e gliela renderò in d e arò fatto con d o il triangolo di 2 linee curve e una retta per basa.

Se lla piramide di lati curvi e basa retta sarà per retta linea taglia[ta] nel mezo de' sua lati, la sua parte superiore fia il terzo della sua quantità. E ss'ella fussi di lati rettim la parte superiore sarebe il quarto della sua quantità.



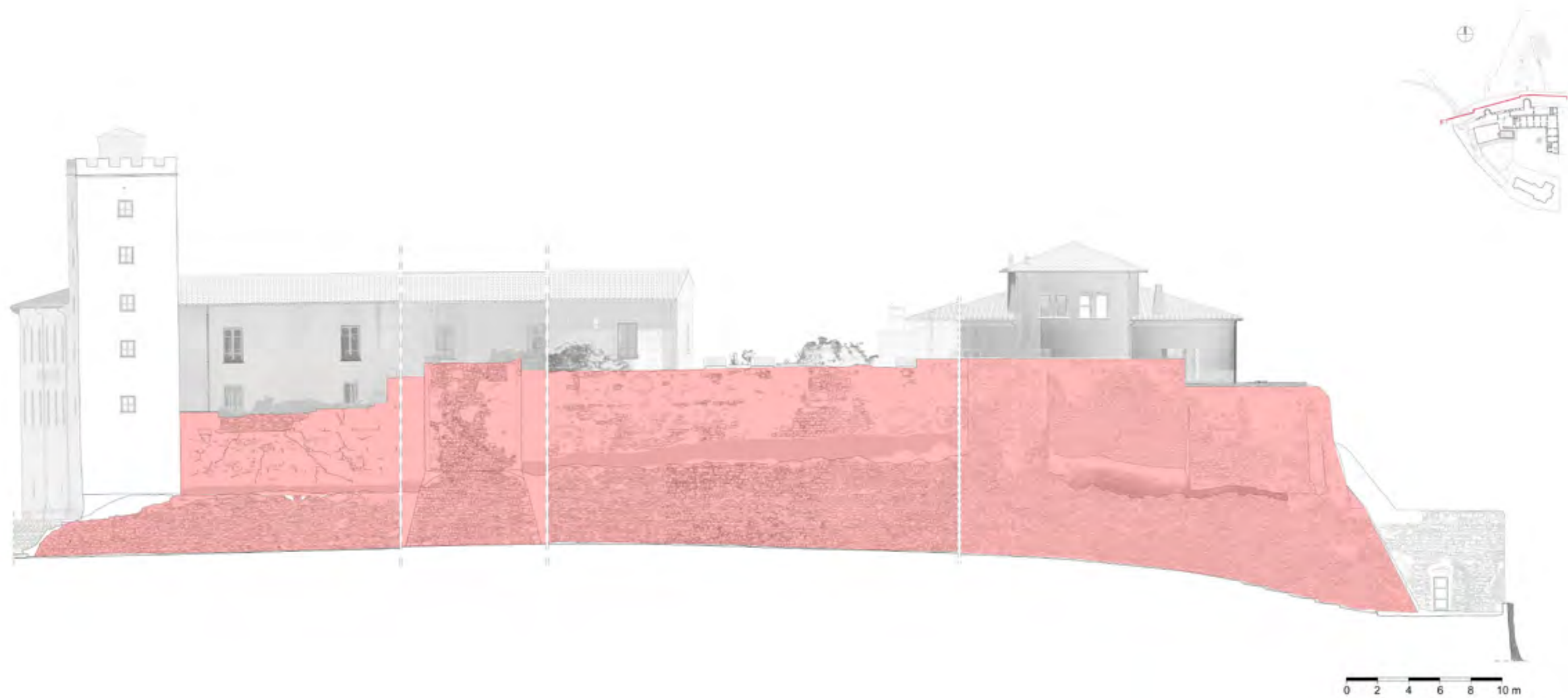
F. 134r

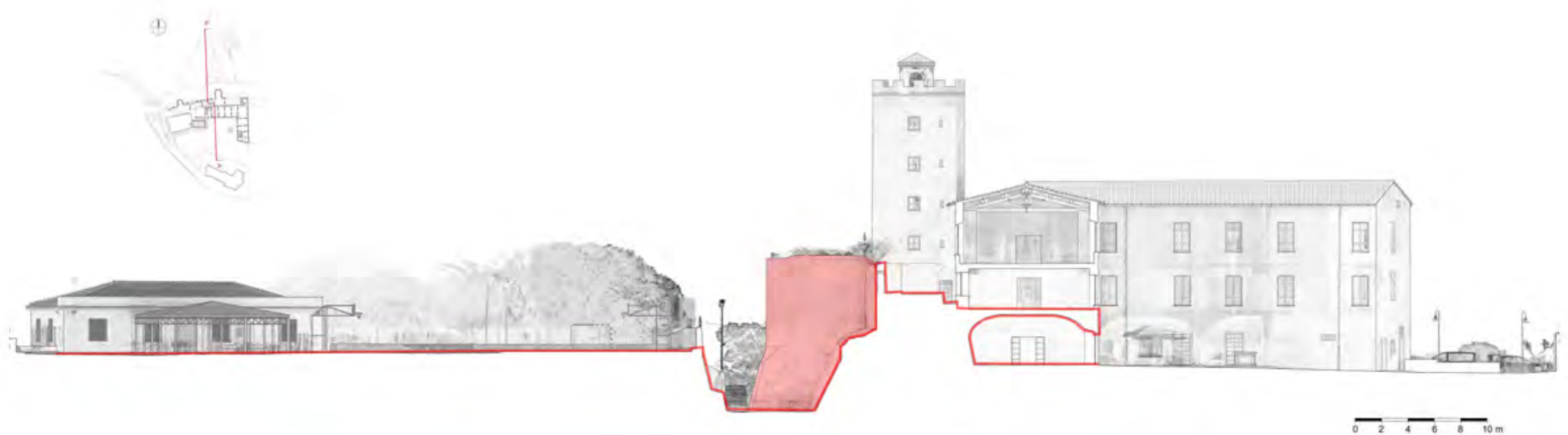
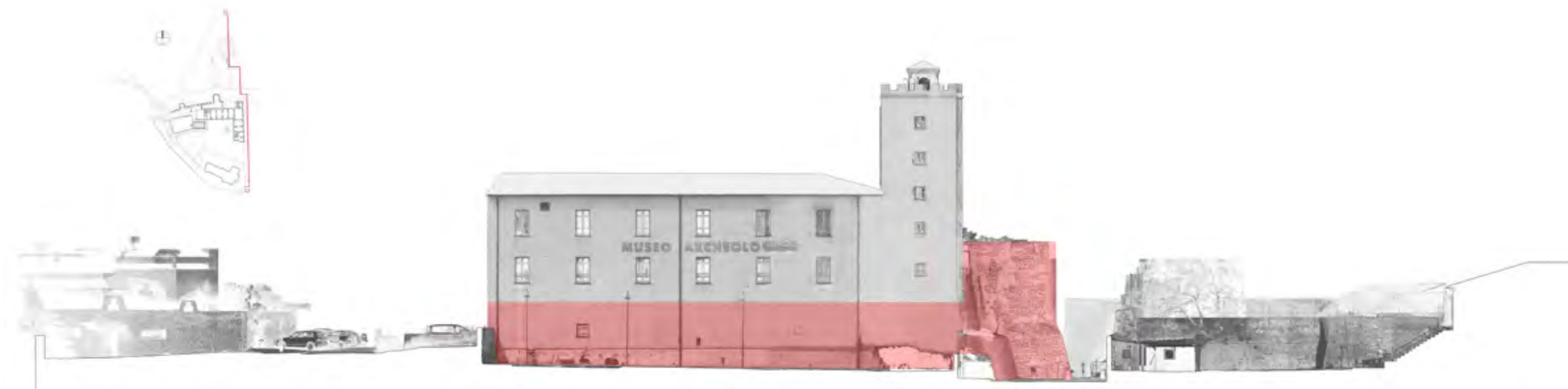


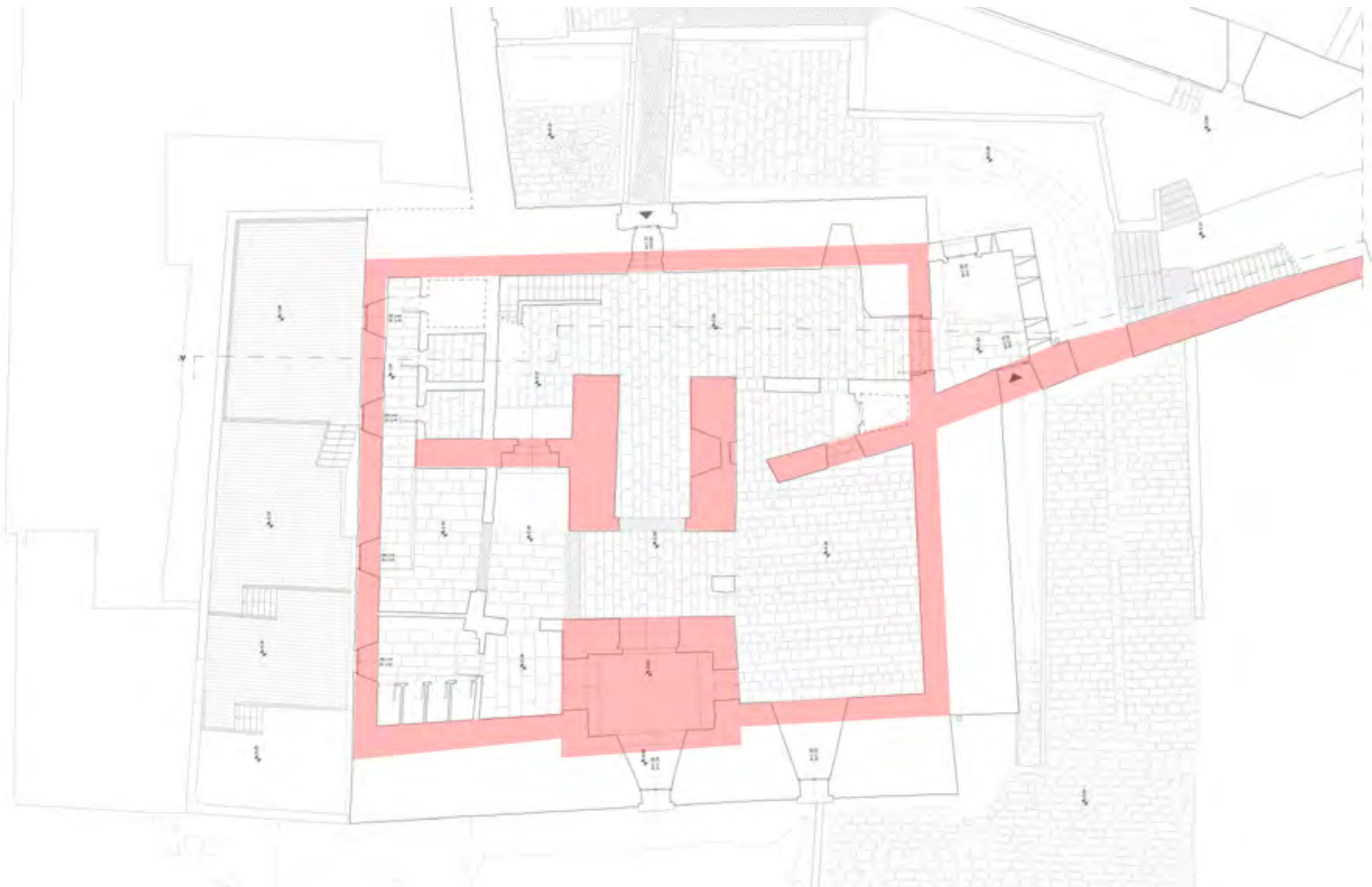


LA PIOMBINO DI LEONARDO
le strutture esistenti al 1502

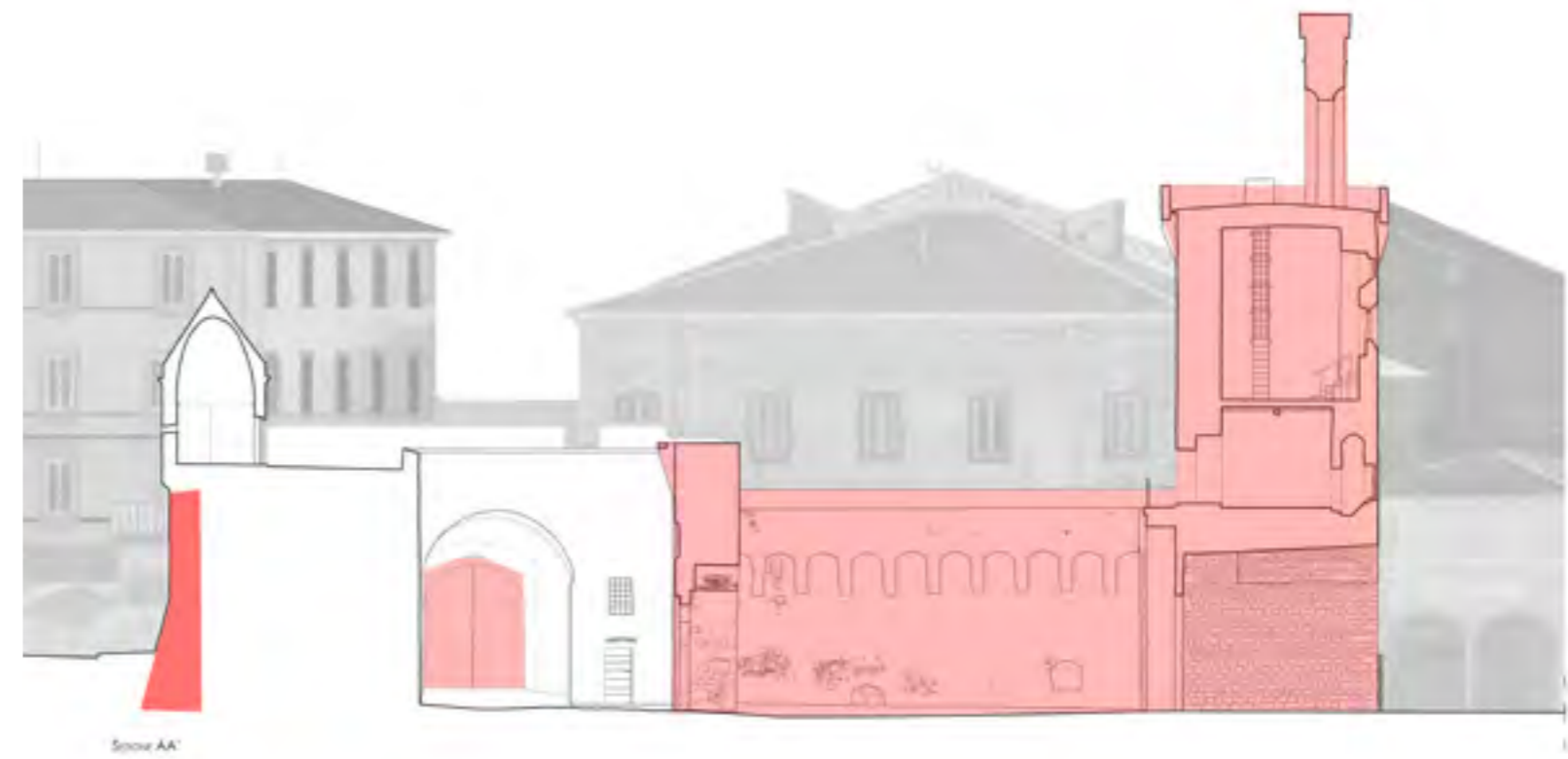
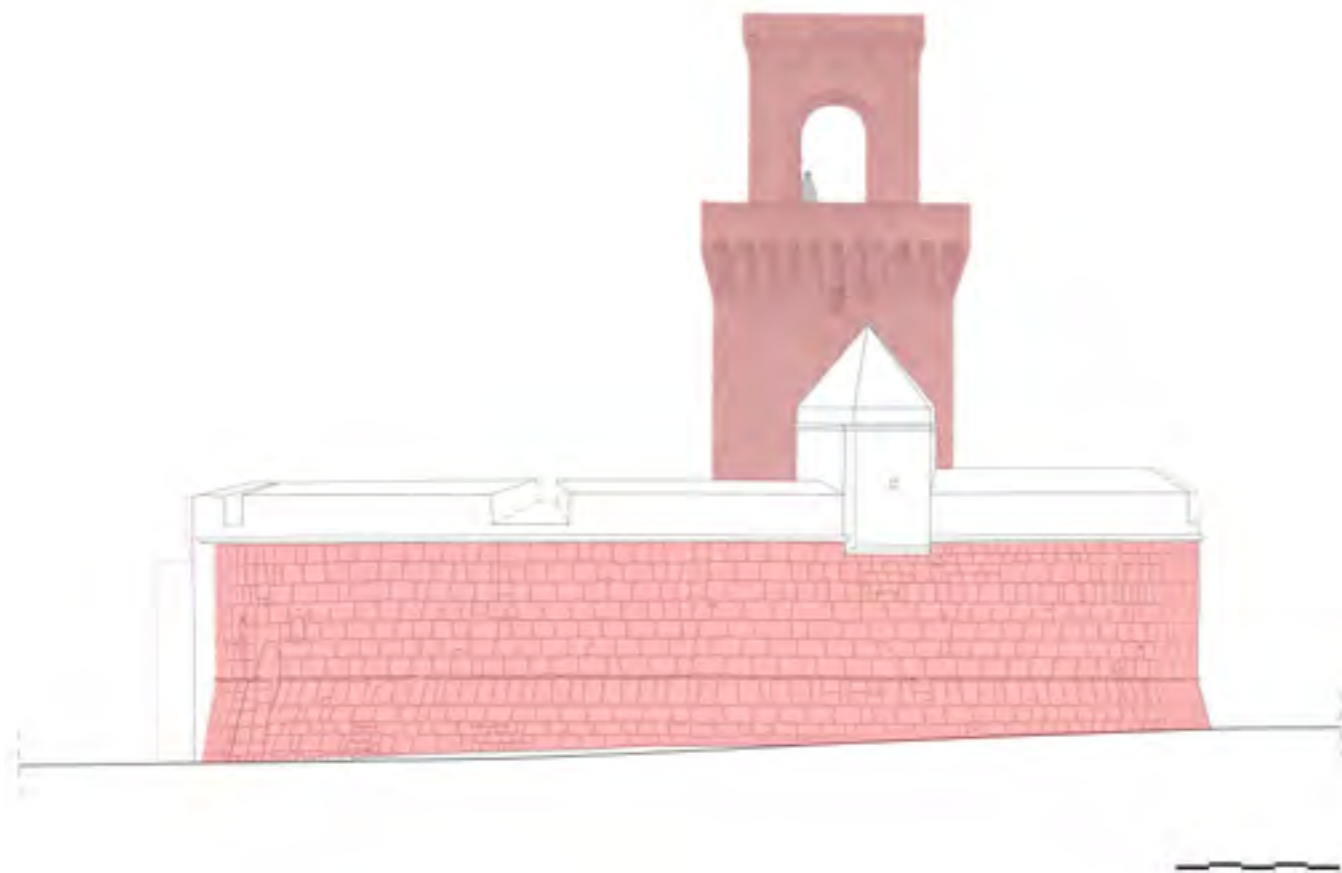


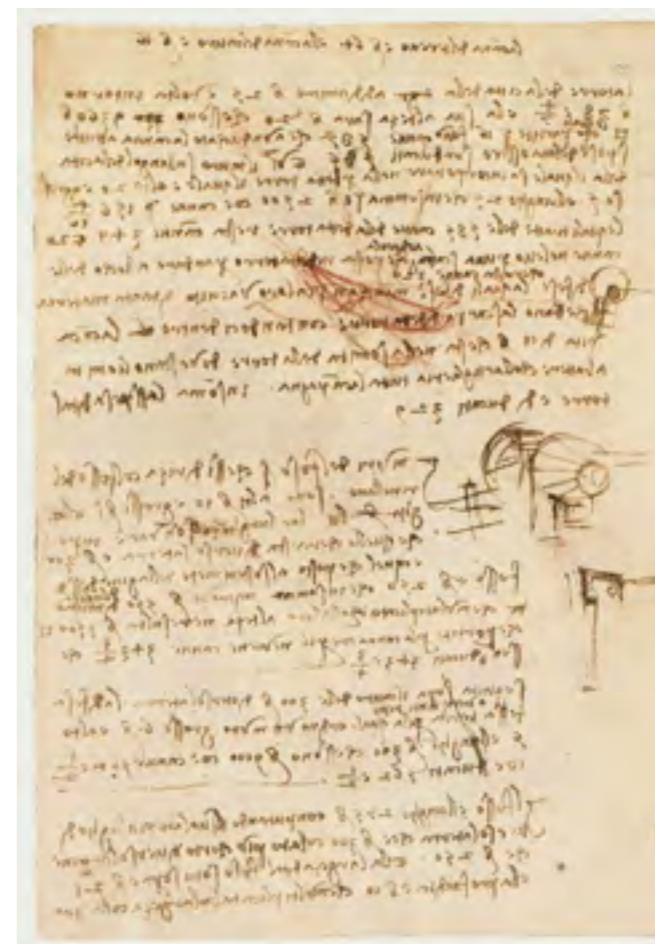












È presente il disegno in assonometria del cassero di piombino ma le annotazioni scritte riguardano principi di geometria e sono stati apposti con un pennino differente, rispetto che al disegno che è stato fatto a matita rossa.

(dalla colonna di sinistra)
d c e a b son detti angoli conalterni esstrinsici. ____
E n t e m o angoli conalterni intrinsici. ____
n m m t angoli giusti oppositi intrinsici. ____
a d e c b angoli opositi estrinseci. ____
a m e c n angolo intrinseco estrinseco opposito.
E l simile si dice di o b e d t.

(dalla colonna di destra)
Quando le lettere si pongan sotto la linea, quella linea è detta indefinita. Ma quando esse son messe in tessta alla linea, quella linea è terminata.
Senpre quell'angolo che ss'ha a nominare, la sua lettera deve in mezzo alle lettere nominate. Di tutti i lati de' triangoli, quel che non si nomina s'intende essere la basa.

Aristotile e Alessandro furono precettori l'un dell'altro. Alesandro fu rico di stato, il qual li fu mezo a usurp[ar]e il mondo. Aristotile ebbe grande scientia, le quale li furon mezo a usurparsi tutte il rimanente delle scientie conposte della soma de' filosafi.

Una medesima bianchezza o scurità parrà di tante varie qualità di chiarezza o di oscurità, quanto fieno varii li occhi che lla vedano. E questo si manifesta perché chiudendo un occhio, la cosa veduta da l'altro pare più oscura, altrettanto che non pareva con due occhi.

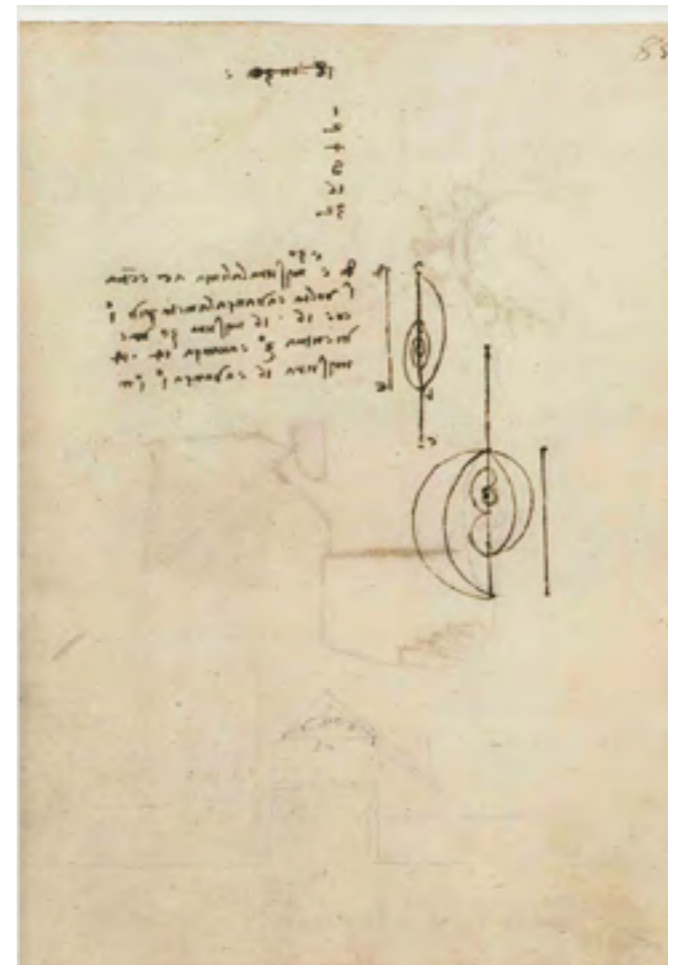
L'onda s'aroverscia indiritto e torna di sopra, e percossa nel lito fa il tomolo e ritorna di sotto, e ssi scontra di novo nella succedente onda che viene di sotto, e lla percote di sotto, e lla riarroverscia di nuovo indiritto e così successivamente seguita.

Vede il doppio più potente splendore li due occhi che porgano a una sola inprensiva, che non fa uno solo occhio. Provasi: veggia l'occhio b tutta l'aria c e, e l'occhio a veggia tutta l'aria c d. Dico che la quantità della aria c d Fia dalla inprensiva giudicata più chiara il doppio che l'aria d e, perché c d è veduta dall'occhio b e dall'occhio a, e l'aria d e è ssol veduta dall'occhio b, [ch]e l'occhio a non vide

Il fosso è llungo 275 braccia, computando il suo lato più lungo di verso la terra, che è braccia 300, col lato più corto, di verso l'argine, ch'è braccia 250. E lla larghezza di tal fosso, sottosopra è braccia 21, e lla profondità è braccia 10 che multiplicata la larghezza colla pro-

La canna del tereno è braccia 64 e la canna del muro è braccia 16. La torre della cittadella ha diametro braccia 25 e volta intorno braccia 78 e 4/7. E lla sua altezza sarà braccia 20, che sono 9360 braccia quadrate, le quali partite per 16 fanno canne 585, che a un ducato la canna, a tutte spese del maestro, son ducati 585. Evi il muro sull'angolo della cittadella, il quale s'ha [a] incorporare nella predetta torre, il quale è alto 20, e grosso 5, e lungo 25, che in soma so[n] braccia 2500, cioè canne 156 4/16. Le quali tratte delle 585 canne della detta torre, resta canne 349. E 20 canne le levo per una scala a chiociola, ch'è posta in detta torre per andare al loco delle difese, che resta canne 329. Le quali difese mancan, per la loro vacuità, di tanta materia, che ffano la scarpa di detta torre, contandoci dentro le concavità si 10 braccia, che sta nella sommità della torre, dove stanno li omni a battere con l'artiglieria tutta la campagna. In somma, la sspesa di tal torre è di ducati 329.

I muri del fosso che ssi diriza col fosso del rivellino, son alti braccia 10 e grossi braccio uno. E lle lor lunghezze son varie, inperochè quello che rresta di verso la terra è bracci 300 e quel ch'è posto al sostenimento dell'ar[g]ine d'esso fosso è braccia 250, che in somma mi trovo braccia 550 di lunghezza di muro, che multiplicata colla loro altezza, ne risulta braccia 5500 quadrate, che partite per la canna, cioè per 16, ne viene canne 343 3/4, che sson ducati 343 e 3/4. Seguita sopra il muro delle 300 braccia, di verso la terra, la difesa, ovvero antipetto d'essa terra, per la quale ordino un muro grosso 6 braccia, e alto 5, e llungo braccia 300, che ssono braccia 9000, cioè canne 562 e 1/2, cioè ducati 552 e 1/2.



Il parapetto sopra il predetto muro di verso la terra è alto braccia 2, computato la maggiore sua altezza di verso la terra, colla minore di fuori, ed è grosso braccia 6, che multiplicato la grossezza colla sua altezza, son braccia 12. E questo 12 rimultiplicato colla sua lunghezza, che sson braccia 300, ne resulta braccia 3600. Le quali ridotte in canne, son canne 225: ducati 225.

Io ci farei sotto una via coperta, per la quale si potessi dare soccorso al rivelin della porta di Piombino. Ma io temo che avendo contro il popolo, quelli con cava trasversale non vi entrassino dentro e ss' insignorissino del rivellino d'essa porta, benchè e' si potessi fare un ponte levatoio a [e]sso rivellino.

Otto esso muro fareno una cava sotterrana, overo strada coperta, del soccorso della cittadella al rivellino dalla porta, nel quale rivellino s'ent[r]erà d'essa cava con un ponte levatoio, acciò che quando il popolo fussi acordato col nemico, che esso popolo, rompendo di ver la terra tal cava, non si potessi insignorire di tal rivellino.

Somma della spesa della predetta fabrica:

La torre.....ducatti 585
I muri de' fossi.....ducatti 343 3/4
Il parapetto.....ducatti 225

Il fosso.....ducatti 945 2/6
In soma la spesa è..ducatti 2099 1/16

Lo spianare del monte, che ssono canne 375, che a 4 lire la canna son 1500 lire. E altrettanto son le canne del monte che resta lungo la marina, che insoma son lire 3000, cioè ducati 428 e 4/7, a 7 lire per ducato, che giunti colli sopradetti 2099 1/16, fanno la soma di ducati 2528.

De pictura e prospettiva de' colori.

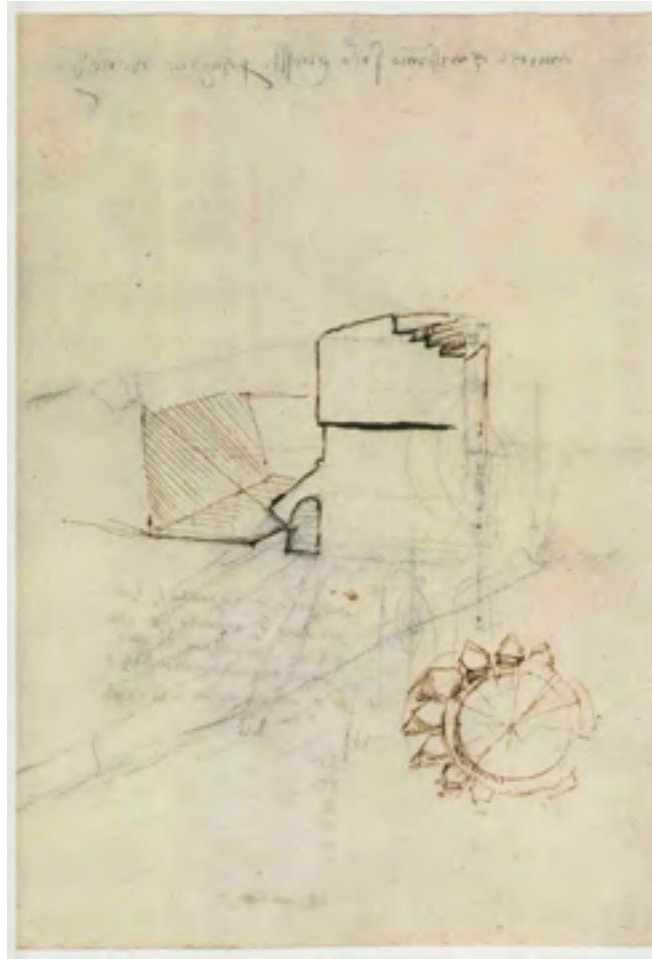
Li primi colori debbono essere senplici, e lli gradi della lor diminutione, insieme con li gradi delle disstantie si debbon convenire. Cioè che lle grandezze delle cose partecipian più della natura del punto, quanto esse li saran più vicine. E lli colori han tanto più a partecipare del colore del suo oriz[on]te, quant'esse a quello si son più propinque.

Del moto delle figure nello spingere o tirare

Lo spingere e 'l tirare sono d'una medesima attio[ne], conciosiachè llo spignere sè ssolo è una asstensione di membra, e 'l tirare una attratione d'esse membra. E all'uno e all'altro potentia s'aggiunge il peso del motore contro alla cosa sospinta o tirata. E non v'è altra diferenza se non che ll'uno spinge e ll'altro tira. Quello che spinge stando in piè, ha il mobile sospinto dinanzi a ssè, come è a. E quel che tira, l'ha dirieto a ssè. Lo spignere e 'l tirare pò essre facto per diverse linie, intor[no] al cent[r]o della potentia del motore, il quale centro, in quanto alle braccia, fia nel logo dove il nervo de l'omero della [s]palla e cquel della poppa, e cquel della padella oposita alla poppa, si giungano coll'osso della spalla superiore.

1,2,4,8,16,32

D e è 30, misura la linia a c e ntra una volta e avanza la metà più uno, cioè 16; 16 misura 30, e vi entra 3°, e avanza 14; 14 misura 16 e avanza 1; 1 m[isura]...



Amico carissimo solo quesste per cagione che ne di....



L'angol fatto nella portione del cerchio così com'eli è causato della meza portione, cioè fattosi basa del diametro del cerchio, così l'angolo retto è di meza statura infra li infiniti ottusi maggior l'un che l'altro e così in delli acuti infinitamente minori l'un che l'altro. Onde diren che quel an[g]olo fia tanto più grosso che lli altri, quanto esso è possto in minore portione di cerchio. E così de converso, sarà tanto l'angolo più stretto quanto maggior portion deriva, tanto sarà di minor grosseza.

Adunque conchiudiamo che tale fia la proportione che ssi ritrova infra i maggiori e minori angolim quale quella che hanno infra loro le porion de' cerchi ove si creano. Ma è proportion conversa. Quadratura di piramide falcate di lati d'infinite varietà di curvità.

Toli 1/2 cerchio e 1/4 d'un cerchio, che sia duplo al primo.

1/2 e 1/8 del cerchio, che ssi quadrupò al primo.

1/2 e 1/16 de cerchio ottuplo al primo.

E così una sopraporre, come vedi.

Overo togli quarto e 1/8 del cerchio al primo dopio, o voi pur quarto e 1/16 del circulo a lui quadruplo. Over quarto e 1/32 del cerchio a lui decimosestuplo.

La nascita di questa ricerca

Questa ricerca si fonda sull'ipotesi di utilizzo delle moderne tecnologie di rilievo digitale per incrementare le conoscenze dei disegni di Leonardo da Vinci che illustrano, nel caso studio specifico, i rilievi e i progetti per fortificare le difese della Signoria di Piombino. Questi disegni nascono come schizzi di studio, come disegni preparatori per presentare un progetto ben più dettagliato di cui si sono perse le tracce: il taccuino in cui sono conservati, il Codice II custodito alla Biblioteca Nazionale di Madrid, veniva utilizzato dal maestro come un quaderno di appunti su cui annotava, come era solito fare, gli argomenti più svariati che gli erano utili sul momento; è perciò frequente, quasi in tutte le pagine del manoscritto, trovare testi e disegni riguardanti tematiche molto differenti tra loro, che spesso si sovrappongono come un palinsesto che rende a volte difficilmente comprensibile la prima intenzione leonardiana nell'utilizzo dei fogli.

Gli studi storici e storici-artistici dell'intervento leonardesco a Piombino hanno una vita relativamente breve, legata alla recente scoperta negli anni '60 dei due codici madrileni dove sono presenti le attività del maestro nella Signoria degli Appiani; nonostante, come abbiamo visto, gli storici siano concordi sull'attribuire a Leonardo un periodo di permanenza a Piombino, nelle ricerche il tema delle fortificazioni progettate per Jacopo IV Appiani è sempre stato affrontato in modo sommario, senza tentare di ricondurre ad architetture specifiche delle fortificazioni della città i disegni leonardeschi, fino a che 20 anni fa la ricerca di Amelio Fara ha consentito di restituire all'intervento di Leonardo un doveroso approfondimento.

In questa situazione si è inserita la mia ricerca, analizzando in primo luogo se tramite l'utilizzo del rilievo fosse possibile approfondire gli studi dei disegni e dei progetti di Leonardo da Vinci per Piombino: è stato subito evidente come il limite delle ricerche precedenti consistesse nel proporre ipotesi sulla base di una morfologia delle architetture fortificate piombinesi alquanto sommarie,

mancando quel *corpus* di informazioni che solo un dettagliato e dispendioso rilievo architettonico poteva essere in grado di fornire.

Il lavoro presentato nelle pagine precedenti analizza tutte le analisi e interpretazioni precedentemente condotte dagli esperti del settore; in un primo momento si concentra sulla lettura e sul confronto delle fonti focalizzandosi nello specifico sull'analisi dei disegni e dei progetti per Piombino contenuti nel Codice II conservato alla Biblioteca Nazionale di Madrid: in particolare è stato molto utile all'interpretazione del disegno la lettura dei testi che Leonardo da Vinci appuntava ai margini delle illustrazioni oppure che nascondevano uno schizzo preliminare quando nella fretta di annotare alcune nozioni il maestro riutilizzava gli spazi nelle pagine del quaderno di appunti. Quello che ancora era necessario sviluppare nella ricerca sull'intervento di Leonardo era uno sguardo ai suoi disegni dal punto di vista architettonico, cercando di comprendere non solo la morfologia degli edifici e delle planimetrie rappresentate, ma anche il metodo con cui l'artista si appropiava alla progettazione di architetture fortificate e le caratteristiche della sua rappresentazione architettonica, sia dal punto di vista artistico che tecnico.

Tutto questo ha portato a riesaminare i documenti originali andando ad analizzare i palinsesti che si possono riscontrare nei vari fogli del codice madrileno che in seguito ad una attenta analisi restituiscono una vera e propria stratigrafia delle fasi di interesse delle tematiche affrontate da Leonardo nell'approccio alla progettazione delle fortificazioni di Piombino.

Il fine di questa tesi è stato di cercare di affermare che il rilievo digitale, realizzata per mano di una figura professionale, il rilevatore, che ha maturato diverse esperienze, nell'ambito della ricerca e della maturazione scientifica, nella lettura delle strutture murarie di interesse storico e archeologico, è un elemento indispensabile per ottenere una attenta e puntuale conoscenza dei luoghi, e quindi per poter associare la forma ai contenuti delle idee descritte,

anch'esse come il rilievo sotto forma di disegni, nei fogli di Madrid.

Fasi della ricerca

La ricerca qua presentata si sviluppa su due metodologie di ricerca differenti: una di studio delle fonti, per comprendere a fondo gli studi e le problematiche che riguardano vari argomenti a carattere storico, architettonico ed evolutivo; un'altra di lavoro pratico sul campo che riguarda lo svolgimento del rilievo, a diretto contatto con le architetture di Piombino.

Per questo motivo questa è stata divisa in più parti: una prima in cui lo studio delle fonti è utile ad estrarre le informazioni riguardanti le conoscenze tecniche, architettoniche e militari, di Leonardo da Vinci, oltre che l'evoluzione delle fortificazioni alla fine del Quattrocento che tanto hanno influenzato la progettazione militare; una seconda parte si focalizza sul caso studio di Piombino, descrivendone sia le vicende evolutive delle sue fortificazioni fino all'arrivo di Leonardo, sia i disegni leonardiani e i progetti piombinesi sia lo sviluppo dei rilievi digitali delle fortezze eseguiti in situ.

Lo studio e la sintesi delle esperienze di Leonardo da Vinci in ambito architettonico sono stati prettamente funzionali a comprendere le conoscenze tecniche del maestro e il loro sviluppo nel tempo: mentre più comunemente si conoscono le doti artistiche e l'inventiva in ambito tecnico-scientifico di Leonardo, di cui sono estremamente note e trattate le opere d'arte e gli studi di macchine e di meccanica, altrettanto non si può dire degli impegni e dei progetti che sono stati eseguiti in ambito architettonico; è stato possibile delineare le conoscenze e gli interessi di architettura che avevano influenzato sia Leonardo che gli altri artisti delle corti rinascimentali, i quali sicuramente si scambiavano, opinioni confrontandosi sulle relative esperienze.

Appurato che le esperienze di Leonardo di architettura sono poco conosciute, probabilmente soprattutto a cau-

sa sia di una poco concreta vena realizzativa degli edifici progettati, sia delle scarse testimonianze materiali delle opere da lui progettate, è necessario affermare che il caso studio oggetto della ricerca affronta una nicchia dell'ambito architettonico, ed è quindi ancor meno noto: si tratta degli studi di fortificazioni, di cui il maestro di Vinci, proveniente dalla cultura di bottega fiorentina, in un primo periodo non era assolutamente esperto. La sintesi degli studi riguardo le fortezze e l'evoluzione del pensiero architettonico-militare è stata necessaria alla comprensione delle idee di Leonardo e ad inserire il lavoro dell'artista dentro un ben più ampio scenario storico di studi di architetture fortificate.

Proprio per questo è stato necessario approfondire subito dopo l'evoluzione delle fortificazioni nel periodo della seconda metà del Quattrocento, descrivendo sinteticamente una situazione politica ed architettonico-militare, in cui Leonardo si trova ad operare; un periodo di forte cambiamento, sia politico che difensivo, che ha interessato tanto le tecniche ossidionali e la composizione degli eserciti, con l'avvento delle armi da fuoco, quanto le difese e quindi le morfologie ed il funzionamento delle fortificazioni: è stata dunque delineata l'evoluzione morfologica delle strutture difensive a partire dalle prime fortificazioni che presentavano torrioni poligonali con l'intento di fiancheggiare le cortine, nei domini dei Malatesta e dei Montefeltro, concentrandosi sull'importanza che ebbe in tali evoluzioni la figura di Francesco di Giorgio Martini, e sull'evoluzione che portò allo stile più maturo, o meglio più in linea con le esigenze del primo Cinquecento, ma non per questo più moderno, ed adatto ad una difesa sistematica di Antonio da Sangallo all'interno dei possedimenti pontifici dell'Italia Centrale.

Per completare un panorama di conoscenze di fine Quattrocento è stato utile completare l'analisi delle fonti del periodo concentrandosi sulla trattatistica caratterizzante l'età rinascimentale: quei testi fondamentali da cui venivano studiati i modelli architettonici teorici e riproposti

nella pratica progettuale, che nel primo cinquecento portarono ad una riscoperta dei testi latini, grazie alle infinite traduzioni del testo di Vitruvio e di un sistematico confronto con le rovine romane; in questo caso rimane sempre molto influente la figura di Francesco di Giorgio Martini di cui viene sintetizzata l'evoluzione delle teorie architettoniche e la realizzazione dei suoi trattati di architettura, uno dei quali fu sicuramente in possesso di Leonardo, influenzandone le teorie architettoniche e militari. La seconda parte della tesi prende invece in analisi la città di Piombino, ricostruendo dalle fonti documentarie e soprattutto dalle recenti ricerche degli esperti del settore, la sua storia, concentrando la trattazione sulla nascita e sull'evoluzione del suo circuito fortificato: dalla nascita del castello del XI secolo, all'ampliamento medievale, fino a delineare una situazione precedente all'arrivo di Leonardo da Vinci in modo tale da riuscire a comprendere cosa apparve agli occhi del maestro fiorentino. Lo studio della documentazione storica è stato integrato dalle recenti analisi archeologiche su alcune strutture della città che hanno permesso di incrementare la conoscenza delle fortificazioni piombinesi.

Dopo aver sintetizzato dalle fonti lo scenario che apparve a Leonardo al suo arrivo a Piombino infine si tratta del suo intervento nella città, analizzando i disegni, la maggior parte dei quali provenienti dal Codice II di Madrid, e descrivendo gli argomenti trattati nei suoi testi e le architetture rilevate e descritte da Leonardo così come le proposte progettuali.

Un ultimo capitolo tratta infine delle tematiche relative al rilievo digitale e alla sua applicazione al caso studio della città fortificata di Piombino, approfondendo l'utilizzo del rilievo ai fini dell'analisi dei disegni di Leonardo; i rilievi, realizzati con le moderne tecnologie digitali, laser scanner e SfM, hanno restituito lo stato dei fatti delle architetture difensive del territorio, le quali sono state sintetizzate in un atlante di elaborati grafici che descrivono la morfologia delle fortificazioni.

Per concludere sono state realizzate delle schede di allineamento in cui i disegni dei progetti descritti nel capitolo precedente sono stati sovrapposti agli elaborati grafici del rilievo digitale realizzato in modo tale da verificare e comprendere le intenzioni di Leonardo; il rilievo è stato fondamentale a comprendere le caratteristiche degli edifici che Leonardo vide nel Cinquecento e che nel corso del tempo hanno subito profonde mutazioni che non permettono all'occhio non esperto del visitatore di rintracciare le porzioni più antiche dei fabbricati; per questo motivo sulla base del rilievo sono state indicate le porzioni di architettura che Leonardo poté vedere e progettare.

Conclusioni e future possibilità di sviluppo

La ricerca mostrata ha potuto verificare l'importanza dell'utilizzo del rilievo digitale come fondamentale strumento di conoscenza delle architetture; grazie al suo utilizzo è stato possibile non solo comprendere a fondo le intenzioni progettuali di Leonardo da Vinci a Piombino ma anche riconoscere ed evidenziare la collocazione in planimetria di altri disegni legati alla città toscana. La realizzazione di un dettagliato database morfologico che descrive nel dettaglio le architetture fortificate era assente, e sarà adesso utile a sviluppare ulteriori studi legati all'architettura militare di Piombino. La ricerca riguardante l'intervento di Leonardo da Vinci potrà essere approfondita ricostruendo per tutte le architetture rilevate, laddove è ancora possibile, una attenta analisi delle stratigrafie murarie, per ricostruire scientificamente l'evoluzione degli edifici difensivi in relazione alle fonti storico-documentarie. Il caso studio di Piombino, oltre a permettere di approfondire l'intervento del maestro, ha potuto evidenziare, come in nessun altro caso per via della grande quantità di disegni preparatori, il metodo progettuale che Leonardo applicava sulle fortificazioni, il suo approccio alle architetture ed al progetto, e confermare la forte influenza che gli altri grandi architetti del periodo avevano sulle sue scelte in ambito di fortificazioni.

BIBLIOGRAFIA

1865 Angelucci, A., *Gli schioppettieri milanesi nel XV secolo*, Milano.

1873 Sanudo, M., *La spedizione di Carlo VIII in Italia*, Venezia.

1894 Beltrami, L., *Il castello di Milano sotto il dominio dei Visconti e degli Sforza dal 1368 al 1535*, Milano, Hoepli.

1897 Cappelletti, L., *Storia della città e stato di Piombino: dalle origini fino all'anno 1814*. Livorno, Tip. Raff. Giusti.

1904 Beltrami, L., *Il decreto per la piazza del Castello ... del 1492*, Milano, Allegretti.

1911 Solmi, E., *Leonardo da Vinci. Il Duomo, il Castello, e l'Università di Pavia*, in B.S.P.S.P., XI, pp.141-203 (poi in scritti vinciani, 1024, pp.15-74).

1911b Solmi, E., *Leonardo da Vinci e i lavori di prosciugamento delle Paludi Pontine ai tempi di Leone X*, in A.S.L. XXXVIII, fasc.29, pp.65-101 (poi in scritti vinciani 1924, pp. 299-336).

1919 Bacci, P., *Opere conosciute di A. Guardi a Piombino sotto la signoria di Jacopo III d'Appiano*, in "Rassegna d'arte Antica e Moderna", IV

1919 Beltrami, L., *Documenti e memorie riguardanti la vita e le opere di Leonardo da Vinci*, Milano, Treves.

1925 Calvi, G., *I manoscritti di Leonardo da Vinci dal punto di vista cronologico storico e biografico*, Bologna, Zanichelli.

1926 Selvelli, C., *Le mura di Fano*, in "Rassegna Marchigiana", V.

1929 Heydenreich, L. H., *Die Sakralbau-Studien Leonardo da Vinci's*, Engelsdorf-Leipzig, Vogel.

1930 Fani, A., *Indice ovvero Succinto Spoglio delle Cose più interessanti ritrovate nei documenti e Libri dello Archivio Vecchio della Comunità di Piombino e nelle Filze dei Tribunali 1840*, ASCP, Comune di Piombino, 403. Piombino, Pavolini.

1939 Cardarelli, R., *Storia di Piombino di Agostino Dati*, estratto dal "bollettino storico livornese", III, I-2.

1943 Calvi, I., *L'architettura militare di Leonardo da Vinci*, Milano, Tipografia Lombarda.

1950 Sacerdote, G., Cesare Borgia. *La sua vita, la sua famiglia, i suoi tempi*. Milano, Rizzoli

1954 Heydenreich, L. H., *Leonardo da Vinci*, New York, McMillan.

1961 Machiavelli, N., *L'arte della guerra e scritti politici minori*, a cura di Bertelli, S., Milano, Feltrinelli.

1962, Daniele, I., *Antimo prete, Massimo, Basso, Fabio martiri sulla via Salaria in Sabina, Diocleziano e Fiorenzo martiri a Osimo nel Piceno, Falconio Pini-ano e Anicia Lucina, santi, confessori*, in Bibliotheca Sanctorum, II, Roma, coll. 62-65.

1964 Pedretti, C., *The Missing Folio 3 of Ms. B*, in R.V., XX, pp. 211-224.

1965 Hale, J. R., *The early development of the Bastion: an Italian chronology, c.1450-c.1534*, in Hale, J. R., Highfield, J. R. L., Smalley, B., *Europe in the Late Middle Ages*, London

1969 Marinoni, A., *Leonardo as a writer in Leonardo's legacy*, pp.57-66.

1970 Schettini, F., *Novità sulla rocca di Imola*, in *Rocche e castelli di Romagna*, vol.I, Bologna, Alfa, pp.53-86

1971 Loi, P., *L'assedio di Piombino del 1448 nella narrazione di Mattia Palmieri*, "Archivio Piombinese di Studi Storici", I, pp.25-26

1971 Prager, F. D., Scaglia, G., *Mariano Taccola and His Book "De ingenieis"*, Cambridge, Mass., M.I.T.

1972 Averlino, A., (detto il Filarete), *Trattato di Architettura*, 2 voll., testo a cura di Finoli, A.M., Grassi, L., introduzione e note di Grassi, L., Milano

1972, Ceccarelli Lemut, M. L., *Il monastero di San Giustiniano di Falesia e il castello di Piombino*, Società Storia Pisana.

1972 De La Croix, H., *Military Considerations in City Planning: Fortifications*, New York.

Press.

1972 Pedretti, C., *La Verruca*, in R.Q., vol. XXV, 4, pp. 417-425

1972b Pedretti, C., *Leonardo da Vinci, The Royal Palace at Romorantin*. Cambridge, Mass., The Belknap Press of Harvard University Press.

1973 Bruschi, A., *Bramante*, Bari, Laterza.

1973 Portoghesi, P., *Roma Barocca*, Bari, Laterza.

1974 Bruschi, A., *Bramante, Leonardo e Francesco di Giorgio a Civitavecchia. La città con porto nel Rinascimento*, in Studi Bramanteschi, Roma, De

Luca, pp. 535-565

1974, Cesaretti, A., *Istoria del Principato di Piombino e osservazioni intorno ai diritti della corona di Toscana sopra i castelli di Valle e Montione*, Bologna, A. Forni

1974 Heydenreich, L. H., *L'architettura militare in Leonardo*, in Reti (ed) Leonardo, pp.136-165

1974b Heydenreich, L. H., *I progetti di Leonardo per fortificare Piombino*, in Almanacco italiano, vol. LXXV, pp.332 sgg.

1974 Reti, L., (a cura di) *Leonardo da Vinci. I Codici di Madrid*, 5 voll., Firenze, Giunti Barbera.

1975 Fontana, V., Morachiello, P., *Vitruvio e Raffaello. Il "De architectura" di Vitruvio nella traduzione inedita di Fabio Calvo Ravennate*, Roma, Officina Edizioni.

1976 Hersey, G. L., *Pythagorean Palaces: magic and architecture in the Italian Renaissance*, Ithaca and London, Cornell University Press.

1976 Scaglia, G., *The Opera de architectura of Francesco di Giorgio Martini for Alfonso Duke of Calabria*, in "Napoli nobilissima", XV, V-VI

1977 Ghelardoni, P., *Piombino. Profilo di Storia Urbana*, Pisa, Pacini.

1977 Pane, R., *Il Rinascimento nell'Italia meridionale*, 2 voll., Milano

1977 Taddei, D. *L'opera di Giuliano da Sangallo nella fortezza di Sansepolcro e l'architettura militare del periodo di transito*, Sansepolcro, Biblioteca Comunale

1978 Bruschi, A., *Nota introduttiva e note a L.Pacioli, de divina proportione*, in Bruschi, Maltese, Tafuri, Bonelli (a cura di), *Scritti rinascimentali*.

1978 Fiore, F. P., *Nuove fondazioni urbane e castellane; strutture abitative e perimetri difensivi*, in Marconi, P. (a cura di) I castelli. Architettura e difesa del territorio tra Medioevo e Rinascimento, Novara, De Agostini, pp. 25-41

1978b Fiore, F. P., *Città e macchine del '400 nei disegni di Francesco di Giorgio Martini*, Firenze.

1978 Pedretti, C., *Leonardo architetto*, Milano, Electa.

1978 Imperi, D., *Il castello di Nepi*, in "Quaderni dell'Istituto di Storia dell'Architettura", 139-150.

1978 Tommasoli, W., *La vita di Gederico da Montefeltro (1422-1482)*, Urbino.

1978 Volpe, G., Savelli, R., *La rocca di Fossombrone. Una applicazione della teoria delle fortificazioni di Francesco di Giorgio Martini*, Urbino.

1979 Di Giorgio Martini, F., *Il codice Ashburnham 361 della Biblioteca medicea laurenziana di Firenze: Trascrizioni e commenti*. Firenze, Giunti.

1979 Mancini, F., *L'opera di Leonardo sulla pianta di Imola di Danesio Maineri*, In N. Vinc., I, pp.37-52

1980 Schofield, R., *Bramante in 1493: one-and-a-half new document*, in B. M., vol. CXXII, 932, pp. 763-764.

1980 Gurrieri, F., *L'architettura delle fortificazioni dalla Toscana all'Europa*, in *Il potere e lo spazio, la scena del principe*, Catalogo della mostra ("Firenze e

la Toscana dei Medici nell'Europa del Cinquecento") Firenze, Electa-Centro Di, pp. 55-72

1981 Cavallaro, A., Mignosi Tantillo, A., Siligato, R., *Bracciano e gli Orsini nel '400*. Roma

1982 Schofield, R., *Ludovico il Moro and Vigevano*, in A.L., 62, pp. 93-140.

1982 Morselli, P., Corti, G., *La chiesa di Santa Maria delle Carceri in Prato. Contributo di Lorenzo de' Medici e Giuliano da Sangallo alla progettazione*, Firenze, Edam.

1982 Marani, P. C., *Leonardo, Francesco di Giorgio e il tiburio del Duomo di Milano*, in A.L., 62, pp. 81-92.

1982b Marani, P. C., *Tre disegni d'architettura militare di Leonardo dal Codice Atlantico*, in A.L., 62, pp. 66-80

1983 Fiore, F. P., *Francesco di Giorgio e il rivellino acuto di Costacciaro*, in "Quaderni dell'Istituto di Storia dell'Architettura", n.s 1-10

1983b Fiore, F. P., *Cultura settentrionale e influssi albertiani nelle architetture vitruviane di Cesare Cesariano*, in "Arte Lombarda", 64, p.43-52

1984 Ciapponi, A., *Fra Giocondo da Verona and his ediction of Vitruvius*, in "Journal of the Warburg and Courtauld Institute", 47, pp.72-90

1984 Frommel, C. L., *Raffaello e la sua carriera architettonica*, in Frommel, C. L., Ray, S., Tafuri, M., *Raffaello architetto*, Milano.

1984 Marani, P. C., *L'architettura fortificata negli studi di Leonardo da Vinci*, Firenze, Olschki.

1984b Marani, P. C., *Disegni di fortificazioni da Leonardo a Michelangelo*, Firenze, Cantini.

1985 Borsi, S., *Giuliano da Sangallo. I disegni di architettura e dell'antico*, Roma.

1985 Fiore, F. P., *La traduzione da Vitruvio di Francesco di Giorgio*, in "Architettura, storia e documenti", 1, pp.7-30

1985 Tomasini Pietramellara, C., Turchini, A., *Castel Sismondo e Sigismondo Pandolfo Malatesta*, Rimini.

1986 Pagliara, P. N., *Vitruvio da testo a canone*, in Settis, S., *Memoria dell'antico nell'arte italiana*. 3 voll., Torino,

1986 Pepper, S., Adams, N., *Firearms & Fortification. Military architecture and siege warfare in sixteenth-Century Siena*, Chicago-London.

1987 Menichetti, P. L., *Storia di Gubbio, dalle origini all'unità d'Italia*, 2 voll., Città di Castello.

1988 Chastel, A., *L'architecture militaire de la Renaissance*, in Chastel, A., Hale, J., *L'architettura militare veneta del Cinquecento*, Milano, Electa.

1988 Parker, G., *The military revolution. Military innovation and the rise of the West 1500-1800*, Cambridge.

1988 Pedretti, C. *Leonardo da Vinci architetto militare prima di Gradisca*, in Chastel, A. (Ed.) *Architettura*

1988 Kolb, K., *The Francesco di Giorgio Material in the Zichy Codex*, in "Journal of the Society of Architectural Historians", XLVII, 2 *militare veneta del Cinquecento*, Milano, Electa

1989 Fara, A., *Il sistema e la città. Architettura fortificata dell'Europa moderna dai trattati alle realizzazioni 1474-1794*, Genova.

1990 Dechert, M. S. A., *The military architecture of Francesco di Giorgio in Southern Italy*. In "Journal of the Society of Architectural Historians", XLIX, 1990, 2

1991 Galluzzi, P., *Prima di Leonardo. Cultura delle macchine a Siena nel Rinascimento*, Milano

1991 Mussini, M., *Il Trattato di Francesco di Giorgio Martini e Leonardo: il Codice estense restituito*. Università di Parma, Istituto di Storia dell'Arte.

1991 Tavera, N., *La santa vergine nella devozione piombinese*, Firenze, Giorgi e Gambi

1992 Scaglia, G., *Francesco di Giorgio. Checklist and History of Manuscript and Drawings in Autograph and Copies from c. 1470 to 1687 and Renewed Copies (1764-1839)*, Bethlehem - London - Toronto, Associated University Press.

1993 Bellosi, L., *Francesco di Giorgio e il Rinascimento a Siena. 1450-1500*, (catalogo della mostra), Milano Electa

1993 Burns, H., *I disegni di Francesco di Giorgio agli Uffizi di Firenze*, in *Francesco di Giorgio architetto*, pp.330-337

1993, Ceccarelli Lemut, M. L., *Populonia e Piombino in età medievale e moderna*, Convegno di studi: Populonia, 28- 29 maggio 1993.

1993, Garzella, G., *Da Populonia a Massa Marittima: problemi di storia istituzionale in M. L. Ceccarelli Lemut, Populonia e Piombino in età medievale e*

moderna, Convegno di studi: Populonia, 28- 29 maggio 1993.

1994 Burns, H., "Restaurator delle ruyne antiche": tradizione e studio dell'antico nell'attività di Francesco di Giorgio, in Fiori, F. P., Tafuri, M., *Francesco di Giorgio*, Milano.

1994 Di Teodoro, F. P., *Raffaello, Baldassare Castiglione e la "lettera" a Leone X*, Bologna

1994 Fiore, F. P., Tafuri, M., *Francesco di Giorgio*, Milano, Electa.

1994, Francovich, R., Farinelli, R., *Potere e attività minerarie nella Toscana altomedievale*, in R. Francovich, G. Noye (a cura di), *La storia dell'alto medioevo italiano (VI-X secolo) alla luce dell'archeologia*. pp.443-465. Firenze.

1994 Frommel, C. L., Adams, N., *The architectural drawings of Antonio da Sangallo the Younger and his circle*, vol. I, *Fortifications, Machines, and Festival Architecture*, Cambridge, Mass.-London

1996, Brogiolo, G. P., *Prospettive per l'archeologia dell'architettura*, In "archeologia dell'architettura", I.

1996 Tavera, N., *Piombino napoleonica (1805-1814). Il principato dei Baciocchi*, Firenze, Giorgi e Cambi.

1997 Lötzt, W., *Architettura in Italia. 1500-1600*, Milano, Rizzoli

1998 Bonvini Mazzanti, M., *Senigallia*, Urbino

1998 Carrara, M., Pozzi, *Cisterne e fontane a Piombino nell'antica città murata*. Pontedera, Bandecchi e Vivaldi.

1999, Bianchi, G., *Prime indagini archeologiche nel castello di Piombino (LI)*. In "Archeologia Medievale", XXVI, 133-138.

1999 Fara, A., *Leonardo a Piombino e l'idea della città moderna tra Quattro e Cinquecento*. Firenze, Olschki.

2000, Banti, O., *Frustula epigraphica. Note di storia e di epigrafia a proposito di sei epigrafi dei secoli XII-XIV*, In "Bollettino Storico Pisano", LXIX, pp. 11-30.

2000b, Banti, O., *Monumenta epigraphica pisana saeculi XV antiquiora*, Pisa.

2001, Bianchi, G., *Castello di Piombino (LI): I risultati delle ultime indagini archeologiche*. In "Archeologia Medievale", XXVIII, 185-190.

2001 Bianchi, G., Zampilli, M., *Il restauro del Castello di Piombino*, in "Manutenzione e recupero nella città storica", atti del IV convegno nazionale, Roma 2001, pp. 115-28

2003, Ceccarelli Lemut, M. L., *Piombino*, in Bianchi, G., (a cura di), *Campiglia, un castello e il suo territorio*, pp.55-58, All'insegna del Giglio, Firenze,

2003 Bianchi, G., (a cura di), *Campiglia, un castello e il suo territorio*, All'insegna del Giglio, Firenze

2003 Fiore, F. P., *Castelli Malatestiani e Feltreschi*, in Turchini, A., (a cura di) Castel Sismondo. Sigismondo Malatesta e l'arte militare del primo Rinascimento, Cesena, Casalini.

2004 Bartoli, M. T., Bertocci, S., (a cura di) *Città e architettura: le matrici di Arnolfo catalogo della*

mostra. Firenze, Edifir

2005, Ceccarelli Lemut, M. L., *Terre pubbliche e giurisdizione signorile nel Comitatus di Pisa (secoli XI-XIII)*, in Ceccarelli Lemut, M. L., *Medioevo pisano. Chiesa, famiglie e territorio*, Pisa, pp.453- 504.

2005, Ceccarelli Lemut, M. L., Garzella, G., *Terre nuove nel Valdarno pisano medievale*, Ospedaletto.

2006 Alisio, G., Bertelli, S., Pinelli, A., *Arte e politica tra Napoli e Firenze. Un cassone per il trionfo di Alfonso d'Aragona*, Modena, Panini.

2006, Forti G., *Fotografia, teoria e pratica della reflex*, Roma, Editrice reflex.

2006, Francovich, R., Bianchi, G., *Capanne e muri in pietra. Donoratico nell'alto medioevo*, in Marcucci, C., Megale, C., (a cura di) *Il Medioevo nella provincia di Livorno. I risultati delle recenti indagini*, Pisa, pp.105-116

2006, Meli, P., Tognetti, S., *Il principe e il mercante nella Toscana del Quattrocento. Il Magnifico Signore di Piombino Jacopo III Appiani e le aziende Maschiani di Pisa*. Firenze, Olschki.

2006, Paris, M. F., *Archeologia dell'architettura in pietra e forme di potere nel territorio di Castagneto Carducci (LI). Secoli XII-XIII*, in "Archeologia dell'Architettura", X, pp.175-190

2006 Settia, A., *Tecniche e spazi della guerra medievale*, Roma, Viella.

2007, Belcari, R., *Plastica architettonica e scultura nel duecento a Piombino*, in G. Bianchi, *Piombino. La chiesa di Sant'Antimo sopra i canali. Ceramiche e architetture per la lettura archeologica di un abitato*

medievale e del suo porto, Firenze.

2007 Bianchi, G., *Dalla progettazione di una chiesa alla definizione degli assetti abitativi della val di Cornia tra XIII secolo e XIV secolo*, in G. Bianchi, *Piombino. La chiesa di Sant'Antimo sopra i canali. Ceramiche e architetture per la lettura archeologica di un abitato medievale e del suo porto*, Firenze

2007 Ceccarelli Lemut, M. L., *L'edificio attraverso le fonti scritte*, in G. Bianchi, *Piombino. La chiesa di Sant'Antimo sopra i canali. Ceramiche e architetture per la lettura archeologica di un abitato medievale e del suo porto*, Firenze

2007, Fichera, G., *Archeologia dell'architettura del cantiere di costruzione della chiesa*, in G. Bianchi, *Piombino. La chiesa di Sant'Antimo sopra i canali. Ceramiche e architetture per la lettura archeologica di un abitato medievale e del suo porto*, Firenze.

2008, Pedretti, C., *Leonardo: la fortezza gustata*, in Viganò, M., *L'architettura militare nell'età di Leonardo: Guerre milanesi e diffusione del bastione in Italia e in Europa*, Bellinzona, Casagrande.

2009 Beni, E., *Populonia dalle origini alla fondazione di Piombino*, Piombino, La Bancarella editrice.

2009 Sguazzi, V., *Suvereto i conti di Suvereto e gli Aldobrandeschi in Val di Cornia e in Maremma, Piombino*, La Bancarella editrice.

2009, Viganò, M., *Leonardo a Locarno: documenti per una attribuzione del "rivellino" del castello, 1507*, Bellinzona, Casagrande.

2009 Zanzi, L., *Machiavelli e gli "Svizzeri" e altre "machiavellerie" filosofiche concernenti la natura,*

la guerra, lo stato, la società, l'etica e la civiltà, Bellinzona, Casagrande.

2011 De Luca, L., *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Palermo, Flaccovio Dario.

2011 Lazzarini, M. T., *Le chiese di Piombino*, Pisa, Pacini editore.

2012 Bianchi, G., *Piombino. Porto e città: una lettura archeologica*. in Ceccarelli Lemut, M. L., Garzella, G., Petralia, G., Vaccari, O., *Il porto di Piombino, tra storia e sviluppo*. Pisa, Pacini.

2012 Van Riel, S., *Alcune precisazioni sul consolidamento degli edifici storici*. Firenze, Italia: Alinea editrice.

2012 Vasari, G., *Le vite* (scelta di 21 titoli), trad. in italiano contemporaneo di Marco Cavalli, Colla Editore.

2013, Apollonio F. I. et al., *3D modeling and data enrichment in digital reconstruction of Architectural Heritage*, in XXIV International CIPA Symposium, ISPRS, "International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences"

2014, Bertacchi S. et al., *Procedure di ottimizzazione dei modelli digitali 3D da rilevamento fotogrammetrico "Structure from Motion" (SfM): il caso del Battistero degli Ariani e del Muro di Droctulfa Ravenna*. in *Il patrimonio culturale tra conoscenza, tutela e valorizzazione. Il caso della "Piazzetta degli Ariani" di Ravenna* a cura di Garzia G., Iannucci A., Vandini M., Bologna

2014, Bertocci S. et al., *Rilievo tridimensionale e analisi dei dissesti della Pieve di Romena*. «Disegnarecon», vol. 8, n.14

2014 Carrara, M., *Piombino città murata*. Piombino, La Bancarella editrice.

2014 Fiore, F. P., *Il "tracé italien": origini concezioni, problemi*, in Faucherre, N., Martens, P., Paucot, H., *La genèse du système bastionné en Europe 1500-1550*, ICN, Orthez.

2015, Balzani M., Maietti F., *Alberti e Brunelleschi: la conservazione della memoria per il restauro della materia. La banca da 3D per la documentazione e il progetto*. «Disegnarecon», vol. 8, n14

2015, Bertocci S., *Il contributo del rilievo urbano dei centri storici italiani per il recupero e la prevenzione della vulnerabilità sismica: alcuni casi studi in Abruzzo, Toscana ed Emilia*

2015, Bertocci S. et al., *Complessi religiosi e sistemi difensivi sul cammino di Santiago de compostela: rilievi ed analisi per la valorizzazione e il restauro della cattedrale di Santa Maria la Real a Sasamòn*, Firenze

2015b Bertocci, S., Parrinello, S., Vital, R., *Masada Notebooks. Report of the research project 2014*, Edifir, Firenze

2015, Cipriani L. Fantini F., *Modelli digitali da structure form motion per la costruzione di un sistema conoscitivo dei portici di Bologna*. «Disegnare. Idee e Immagini», anno XXVI vol.50

2015, Gaiani M., *I portici di Bologna Architettura, Modelli 3D e ricerche tecnologiche*, Bologna

2016, Bianchi, G., Gelichi, S., *Un monastero sul*

mare, Università di Siena.

2016, Pancani G., *Piazza dei Miracoli a Pisa: il Battistero Metodologie di rappresentazione e documentazione digitale 3D*, Firenze

2017, Arrighetti, A., *Rocca San Silvestro. Archeologia per il restauro*, Firenze, Firenze University Press.

2017 Bigongiari, M., *El registro de la base de datos 3d*, in Parrinello S., et al, *El palacio del Generalife: Del levantamiento digital al proyecto de gestión*, Pavia, University press.

2017, Minutoli G., *Percorsi di conoscenza per la salvaguardia della città storica*, Firenze: DIDApres.

2017, Pancani, G., *La Città dei Guidi: Poppi. Il costruito del centro storico, rilievi e indagini diagnostiche*. Edifir. Firenze.

2017b, Pancani, G., *Rilievo delle lastre tombali del Camposanto Monumentale di Piazza dei Miracoli a Pisa*, in "RESTAURO ARCHEOLOGICO", 2

2017, Rinaudo, F., *Analisi della qualità del rilievo laser scanner architettonico e criteri di verifica*, in Pancani, G., *La Città dei Guidi: Poppi. Il costruito del centro storico, rilievi e indagini diagnostiche*. Edifir. Firenze.

2017 Vecce, C., *La biblioteca perduta, I libri di Leonardo*, Salerno, Salerno editrice

2018 Beni, E., *Storia di Piombino. Dalle origini ai giorni nostri*. Piombino, La Bancarella editrice.

2018 Pancani, G., Bigongiari, M., *The integrated survey of the Pergamum by Nicola Pisano in the cathedral of Pisa* in DCH2017 Digital Cultural Heritage

International Conference, Berlin (Germany)

2019, Bertocci, S., Bigongiari, M., Ricciarini, M., *Digital survey for landscape knowledge: Garfagnana case studies for tourism development and Versilia case study for hydraulic analysis*, in "Disegnare Con", vol 12, n.22

2019 Fiore, F. P., *Architettura e arte militare, mura e bastioni nella cultura del Rinascimento*. Roma, Campisano editore.

Abstract

This research focuses on the study of the designs and projects that Leonardo da Vinci carried out for the fortification of the city of Piombino, with the intention of improving knowledge, an intervention which, although already partially analyzed, still presents important hints for the deepening of the work of the master of Vinci.

In particular, the work involved the realization of detailed digital 3D surveys of the fortifications still existing to create a morphological documentary base useful for comparing, with the architectures that still exist today, the drawings contained in Code II preserved in the National Library of Madrid, in which they are contained the sketches for the Piombino projects.

The importance of Piombino in the design of architectural works in the life of Leonardo da Vinci consists not only in the concreteness of the intervention, really requested by Jacopo IV Appiani and necessary after the invasion of Cesare Borgia, but also in the quantity of notes and drawings that Leonardo handed down to us in his manuscript, which makes the Piombino experience the most documented military architecture project in the master's career.

The contribution of the digital survey, performed with modern laser scanner and SfM technologies, allowed to obtain highly detailed drawings that would allow to document the fortified architectures of Piombino and to refer to the historical-documentary and archaeological analyzes carried out by the experts over the years of the sector on the medieval city and on the Renaissance Lordship.

The ability to manage large databases of information has made it possible to create highly reliable cartographies of the existing urban fabric to understand the relationships between fortified architecture in their design within the modern system of defenses.

The approach to the figure of the master of Vinci re-

quired the in-depth study of his architectural works and in particular of the evolution of his military knowledge which, after the Milanese period at the service of the Duke Sforza, rapidly progressed and led him to become a reference figure in the design of fortification for at least a decade.

The intervention of Leonardo in Piombino falls in fact in a period of continuous updating of the oxidation tactics and of the morphology and functioning of the defensive structures, which led a few decades later to the definition of the cardinal principles of modern fortified architecture.

This period of continuous evolution and discovery highlighted the need for Leonardo himself to confront the architectures and ideas of contemporary architects, while the approach to a new field of investigation such as the martial one required the study of texts and treatises classics of the Renaissance period. In this continuous research and study, the relationship with the Sieneese architect Francesco di Giorgio Martini was privileged, a pivotal figure in the evolution of fortified architecture of which Leonardo possessed a copy of the first version of the civil and military architecture treatise, from which he had surely resumed the forms experimented by Martini during his life on the field at the service of Federico da Montefeltro.

The resumption of all these topics, from the analysis of the Leonardian architecture, from the comparison with Renaissance studies and treatises, from the study of research on archival documents, from the study of archaeological and architectural evidences, it was possible on the basis of the survey to further investigate further the knowledge of the condition in which Leonardo found Piombino and what his intervention made practically, also allowing to clarify the ideas in the field of military architecture of the master and his design method.

Abstract

Questa ricerca si concentra sullo studio dei disegni e dei progetti che Leonardo da Vinci ha eseguito per la fortificazione della città di Piombino, con l'intenzione di migliorare la conoscenza un intervento che, seppur sia già in parte stato analizzato, presenta ancora degli importanti spunti per l'approfondimento dell'opera del maestro di Vinci. In particolare il lavoro ha interessato la realizzazione di dettagliati rilievi digitali delle fortificazioni ancora esistenti in modo tale da creare una base documentaria morfologica utile a confrontare i disegni contenuti nel Codice II conservato alla Biblioteca Nazionale di Madrid, in cui sono contenuti gli schizzi per i progetti di Piombino, con le architetture ancora oggi esistenti.

L'importanza di Piombino all'interno della progettazione di opere architettoniche nella vita di Leonardo da Vinci consiste non solo nella concretezza dell'intervento, realmente richiesto da Jacopo IV Appiani e necessario dopo l'invasione di Cesare Borgia, ma anche nella quantità di note, appunti e disegni che Leonardo ci ha tramandato nel suo manoscritto, cosa che rende l'esperienza piombinese il progetto di architettura militare più documentato nella carriera del maestro.

Il contributo del rilievo digitale, eseguito con le moderne tecnologie laser scanner e S.f.M., ha permesso di ottenere elaborati grafici altamente dettagliati che consentissero di documentare le architetture fortificate di Piombino e di basare sulla carta le analisi storiche-documentarie ed archeologiche che negli anni sono state condotte dagli esperti del settore sulla città medievale e sulla signoria rinascimentale.

La possibilità di gestire grandi database di informazioni ha consentito di realizzare cartografie altamente affidabili del tessuto urbano esistente per comprendere le relazioni tra le architetture fortificate nella loro progettazione all'interno del sistema moderno di difese.

L'approccio alla figura del maestro di Vinci ha richiesto

lo studio approfondito delle sue opere architettoniche ed in particolare dell'evoluzione delle sue conoscenze in ambito militare che, dopo il periodo milanese al servizio del Duca Sforza, sono rapidamente progredite e lo hanno portato a divenire una figura di riferimento nella progettazione di fortificazione per almeno un decennio.

L'intervento di Leonardo a Piombino rientra infatti in un periodo di continuo aggiornamento delle tattiche ossidionali e della morfologia e del funzionamento delle strutture difensive, che hanno portato pochi decenni più tardi alla definizione dei principi cardine dell'architettura fortificata moderna.

Questo periodo di continua evoluzione e scoperta ha evidenziato la necessità dello stesso Leonardo di confrontarsi con le architetture e le idee degli architetti a lui contemporanei, mentre l'approccio ad un nuovo campo di indagine come quello marziale ha necessitato lo studio dei testi e delle trattazioni classiche del periodo rinascimentale. In questa continua ricerca e studio, si è privilegiato il rapporto con l'architetto senese Francesco di Giorgio Martini, figura cardine nell'evoluzione delle architetture fortificate di cui Leonardo possedeva una copia della prima versione del trattato di architettura civile e militare, da cui aveva sicuramente ripreso le forme sperimentate dal Martini nell'arco della sua vita sul campo al servizio di Federico da Montefeltro.

La ripresa di tutti questi argomenti, dall'analisi delle architetture leonardiane, dal confronto con gli studi e la trattatistica rinascimentale, dallo studio delle ricerche sui documenti d'archivio, dallo studio delle evidenze archeologiche ed architettoniche è stato possibile sulla base del rilievo approfondire ulteriormente la conoscenza della condizione in cui Leonardo ha trovato Piombino e cosa ha apportato praticamente il suo intervento, consentendo inoltre di chiarificare le idee in campo di architettura militare del maestro ed il suo metodo di progettazione.

RINGRAZIAMENTI

Le pagine e il lavoro che ho presentato in questo volume sono il frutto di un percorso di crescita, non solo dal punto di vista accademico, ma soprattutto come individuo; sono in particolare le esperienze che ho avuto modo di affrontare e i rapporti interpersonali che ho potuto stringere e rafforzare che mi hanno consentito di maturare una mia personale forma mentis ed un approccio alle problematiche spero più consapevole. I ringraziamenti per questa tesi sono quindi destinati a tutte le persone che in questi tre anni mi hanno accompagnato, in modi differenti, in questo cammino.

Fin da ragazzo sono sempre stato additato come troppo sintetico e non mi sento oggi di modificare questa abitudine: mi conterrò in poche righe, non me ne vogliate!

Per primo il prof. Bertocci, Stefano, che ricordandomi spesso quanto non capisco nulla, mi ha sempre spinto ad innamorarmi delle mie ricerche; un punto di riferimento insostituibile.

La prof. Pilar Chias per la disponibilità e l'accoglienza che ho ricevuto ad Alcalá

Il prof. Parrinello, Sandro, per gli insegnamenti, le esperienze e la concretezza, che ammiro

Il prof. Pancani, Giovanni, per la continua fiducia, per gli instancabili consigli e per i molti insegnamenti

Il prof. Minutoli, Gianni, perchè è vero che uno schiaffo, a volte, serve! Oltre che ovviamente per i molti insegnamenti

Tutti i compagni di dottorato, per il tempo, per i confronti, per gli scontri e per la passione, un continuo sprone a fare sempre meglio: e per questo ringrazio Marco, Monica, Pietro, Federico, Anna, Andrea, Nena e Anastasia; non posso dimenticare allo stesso modo Francesca e Raffaella

Ringrazio Giacomo per la pazienza, troppa, e il continuo aiuto; Diego e Gianni perchè altrimenti si offendono, soprattutto Diego; senza di loro a questo progetto sarebbero mancate molte risate.