

Riconoscimento e tutela di un complesso monumentale storico in ambiente urbano mediante l'integrazione di metodologie di rilevamento e di tecniche geofisiche non distruttive: l'area di Santa Croce nel quartiere Castello a Cagliari

Andrea Pirinu

DICAAR, Università degli Studi di Cagliari

Roberto Balia

DICAAR, Università degli Studi di Cagliari

pagina a fronte

Fig. 1
l'area di Santa Croce
(fonte: <http://www.sardegnaeoportale.it/webgis2/sardegnafotoaeree/>).

Abstract

Lo sviluppo di una indagine multidisciplinare finalizzata alla conoscenza dei complessi monumentali storici in ambito urbano assume un ruolo di primaria importanza per la tutela del patrimonio architettonico e paesaggistico.

Con tale obiettivo l'integrazione tra metodologie di rilevamento e metodologie geofisiche si è dimostrata un utile supporto alla ricostruzione delle vicende costruttive del bastione di Santa Croce a Cagliari, sito pluristratificato interessato a partire dal Cinquecento da numerose sovrapposizioni e ricostruzioni.

L'impiego combinato di tecniche diagnostiche non distruttive di tipo geofisico particolarmente utili nei casi in cui non sia possibile l'effettuazione di indagini invasive di notevole impatto come scavi e sondaggi, ha difatti permesso di approfondire la conoscenza del sistema costruttivo e funzionale dell'opera militare.

Gli esiti dell'indagine hanno consentito di definire le caratteristiche stilistiche costruttive dell'opera cinquecentesca, rivelare l'utilizzo di soluzioni differenti da quanto sinora riscontrato nelle piazzeforti spagnole dell'epoca, circoscrivere l'area interessata dalla ricostruzione documentata nelle fonti storiche, utili tasselli conoscitivi anche in vista di nuovi interventi progettuali che prevedono, tra l'altro, la realizzazione di un parcheggio interrato alla base dello stesso bastione.

Il rilievo per la conoscenza e la tutela dei complessi storici urbani (AP)

La rilevazione del patrimonio storico urbano rappresenta il passaggio preliminare necessario all'individuazione delle corrette strategie di intervento e pianificazione.

Un obiettivo che può essere raggiunto – completata l'acquisizione e l'analisi della documentazione d'archivio – attraverso la predisposizione di un progetto di rilievo e di una documentazione grafica ed informativa funzionale alle diverse scale di lettura e la costruzione di una banca dati capace di rappresentare – attraverso modelli bidimensionali e tridimensionali – la complessità del sistema indagato.

Tale complessità può oggi essere esplorata e gestita grazie alle tecnologie informatiche le quali rendono possibile la produzione di un *database* tri-



Fig. 2
L'area di Santa Croce rappresentata nella cartografia storica tra Cinquecento e prima metà del Novecento. Progetto di Rocco Capellino (1), disegno di Giorgio Paleari (2), carta settecentesca (3), carta del Ponsiglione (4), carta del Genio Civile (5), catasto (6). Nei disegni osserviamo le modificazioni intercorse e la presenza della fossa di San Guglielmo ancora libera dalla presenza degli edifici universitari. (Studio e elaborazione grafica A.Pirinu)

dimensionale e una sintesi di alto valore scientifico dei dati architettonici attraverso la realizzazione di modelli digitali¹.

Gli elaborati prodotti hanno difatti il compito di trasmettere, attraverso un linguaggio grafico tecnico -che ricorre a convenzioni e simbologie condivise dagli specialisti- ed al contempo di facile comprensione anche per i non addetti ai lavori, non solo le problematiche riscontrate nel sito, ma anche quei valori culturali condivisi che suscitano una attenzione indispensabile alla sua tutela.

Il conseguimento di tale obiettivo rende necessaria la definizione di strategie di documentazione che selezionino le procedure e le strumentazioni più adatte, pianificando le diverse fasi operative e i differenti livelli di informazione e di approfondimento².

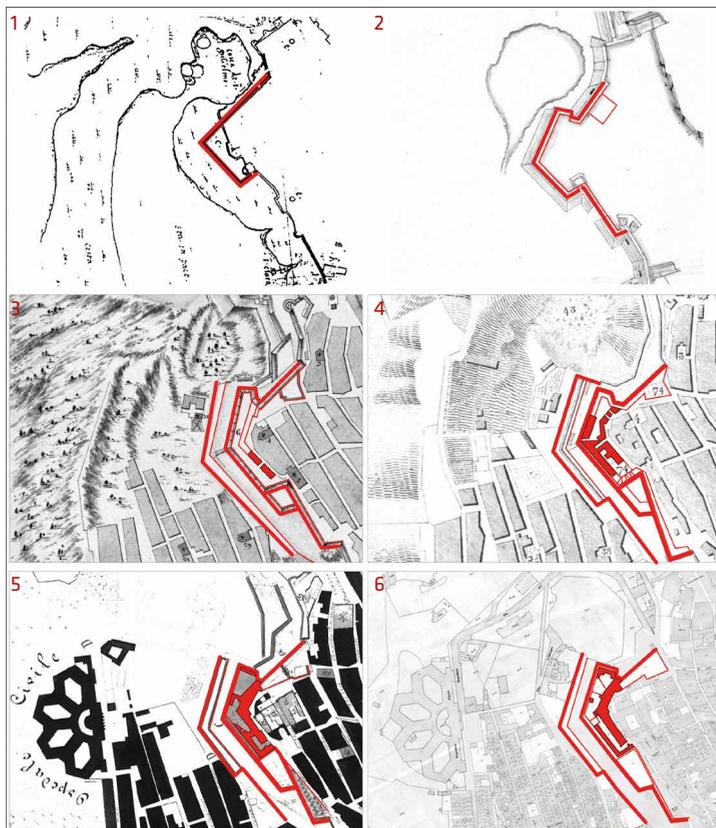
La complessità ed il possibile degrado strutturale dei complessi storici urbani richiede pertanto la progettazione di un percorso conoscitivo mirato all'ottenimento di informazioni a diverse scale di dettaglio ed al contempo l'impiego di procedure "no contact" quali "le strumentazioni laser scanner e fotogrammetriche che escludendo il contatto diretto con la superficie muraria, risultano le tecniche maggiormente efficaci per la diagnostica non invasiva su patrimoni a rischio"³. Tra questi metodi le tecniche foto-

¹ L'impiego di dati fotogrammetrici, laser scanner e altri, anche integrati, consentono difatti di ottimizzare il processo di modellazione utilizzando ogni singolo strumento al meglio delle sue caratteristiche e prestazioni (Remondino 2011: 96).

² Spesso il modello dell'isolato, dell'aggregato o del centro storico, restituito attraverso elaborazioni digitali bidimensionali e tridimensionali, è rappresentativo del livello di conoscenza che si intende raggiungere relativamente a tutti gli aspetti del costruito: architettonici, morfologici, tipologici, figurativi, geometrici, proporzionali, metrici, dell'apparecchiatura costruttiva storica, del danno architettonico, del quadro fessurativo, dei danni strutturali, e del degrado in tutti i suoi aspetti (Cfr. Bini M., Bertocci S. Il rilievo per il restauro dei tessuti storici, in *DisegnareCon*, a cura di Bini M., Bertocci S., *The survey for the restoration of historical heritage volume 10/ n.18* - giugno 2017, pp. 1-4).

³ Cfr. Pancani 2017, Il centro storico di Poppi, analisi a livello urbano per la valutazione del rischio sismico, in *DisegnareCon*, a cura di Bini M., Bertocci S., *The survey for the restoration of historical heritage volume 10/ n.18* - giugno 2017, pp. 9.1-9.10.

⁴ Actualmente el proceso del dibujo arqueológico pasa sin lugar a dudas por la obtención del modelo 3D de gran calidad, fácilmente gestionable y con una gran precisión dimensional, que incluya un aspecto hiperrealista (Cfr. Pablo Rodríguez-Navarro. Reflexiones sobre el levantamiento arqueológico actual, in *DisegnareCon*, *Archaeological drawing*, volume 10/ n.19 - dicembre 2017).



grammetriche hanno avuto nel recente periodo un veloce sviluppo ed una costante applicazione in ambito architettonico e archeologico che sempre più spesso le pone come valida alternativa al laser scanner per gli investimenti finanziaria ridotti, relativa facilità di utilizzo e post processamento dei dati, precisione metrica e riproduzione fotorealistica⁴.

Tuttavia nel caso specifico di una opera bastionata la documentazione acquisita attraverso il rilievo architettonico fornisce informazioni relative alla sola “pelle” dell’architettura, integrate tuttalpiù dall’acquisizione dei dati relativi a passaggi, cunicoli o in generale a spazi interni necessari al suo funzionamento, ammesso che siano realmente accessibili.

Questi dati per quanto importanti e assolutamente necessari, poco o nulla dicono sulle caratteristiche complessive di un sistema costruttivo la cui conoscenza diretta risulta impossibile se non a seguito di scavi o sondaggi non sempre consentiti e comunque non sempre efficaci anche per la frequente presenza di numerose stratificazioni.

L’integrazione del rilevamento architettonico con metodi geofisici⁵ può favorire il superamento di tale limite e consentire la formulazione di ipotesi su possibili cause di dissesto.

Nell’indagine presentata l’approfondimento della conoscenza del bastione di Santa Croce e la sua rappresentazione -non solo esteriore- vengono perseguite con l’integrazione di rilevamento architettonico e l’impiego combinato⁶ del GPR e delle tomografie sismiche “*up-hole*” - queste ultime di rado impiegate in archeologia (Balìa, Pirinu 2018).

Il bastione di Santa Croce a Cagliari (AP)

L’area di Santa Croce conserva tutt’ora forme e strutture dell’opera militare realizzata nel corso di due secoli ed i passaggi significativi sono rappresentati nella cartografia storica⁷ (fig. 2) selezionata per il presente studio.

Il bastione con le sue opere accessorie viene realizzato nella seconda metà del Cinquecento per volere dei re spagnoli e determina un ampliamento del settore occidentale del perimetro fortificato del quartiere Castello e una conseguente crescita della città murata.

L’architettura è costituita da un potente terrapieno⁸ sostenuto da setti murari generalmente collegati da archi e chiuso esternamente da una camicia – anch’essa in muratura – non ammorsata agli stessi setti, elementi costruttivi prescritti con perizia nei trattati (fig. 3) che ne precisano le caratteristiche stilistico costruttive e impiegati nei cantieri delle piazzeforti della Sardegna (fig. 4) e del Mediterraneo spagnolo⁹. L’analisi della documentazione grafica d’archivio permette di osservare i diversi momenti che hanno condotto all’attuale configurazione, a partire dagli adeguamenti cinquecenteschi delle mura medievali per giungere alla progressiva occupazione del complesso monumentale da parte di edifici prima ad esclusivo uso militare, poi privato e pubblico.

Un primo intervento di inizio Cinquecento viene difatti integrato, nel periodo 1552-1578, dall’opera inizialmente progettata e realizzata da Rocco Capellino e completata dai fratelli ticinesi Jacopo e Giorgio Paleari Fratino,

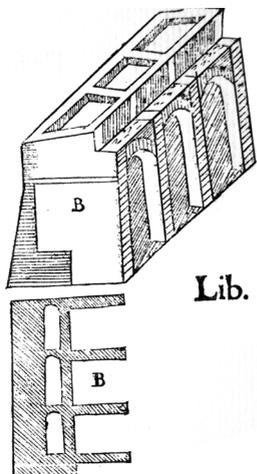
⁵La prospezione geofisica è spesso utilizzata nelle sue diverse applicazioni nello studio di strutture storiche e di importanti siti archeologici; tra i metodi citiamo il GPR, la tomografia a rifrazione sismica, la tomografia a resistività elettrica, i sondaggi elettromagnetici. Significative applicazioni in Orlando, Cardarelli, Cercato, & De Donno, 2015; Ovenden, 1994; Polymenakos, Papanarinopoulos, Miltiadou, & Charkiolakis, 2005.

⁶L’utilizzo combinato consente una lettura stratigrafica dell’opera bastionata più efficace in quanto la ridotta profondità (max 3 metri) della prospezione condotta con GPR nelle abitazioni presenti lungo il perimetro esterno del bastione è compensata e integrata dal campo d’azione delle tomografie che investe l’intero terrapieno lasciando solo qualche “vuoto informativo” in prossimità della quota del cortile della caserma.

⁷Tra le numerose fonti cartografiche analizzate sono state selezionate alcune di particolare interesse: il progetto di Rocco Capellino per le fortificazioni di Cagliari (Biblioteca Apostolica Vaticana, Cod. Barb. Lat. 4414 f.41v,42r), disegno di Giorgio Paleari relativo alle opere realizzate dai fratelli Paleari (Archivio General de Simancas, MPD, 08,019), la Pianta della città di Cagliari e dei suoi borghi (ASTO, sezione Carte topografiche e disegni/Carte topografiche segrete), la carta di Luigi Ferrero Ponsiglione (Archivio Storico del Comune di Cagliari, Stampe antiche della città di Cagliari, 1.A.23), Genio Civile (Istituto Storico e di Cultura dell’Arma del Genio, Roma), catasto geometrico degli anni ‘20 del Novecento.

⁸L’opera realizza un salto di quota di 20 m, superiore alla “ordinaria altezza” di un bastione pari a 8 metri, come precisato nel trattato *Della fortificazione della città* (Libro I, Cap. XI, Delle misure di tutti i membri della Fortificazione, e delle parti di quelli) del Maggi e del Castriotto; il Capitano Castriotto *la vuole alta dal fondo del fosso fino al cordone piedi 24. E piedi 8, dal cordone alla cima, che con un piede della grossezza del cordone e in tutto dal lato di fuori piedi 33, e di dentro 36, per cagione del colmo piu alto che non e di fuori.*

⁹Una disamina dell’applicazione dei modelli costruttivi adottati dai fratelli Paleari in Pirinu 2013 e dei Paleari in copresenza con gli Antonelli in Parrinello S., Pirinu A. 2016.



Lib. II.

Fig. 3
 tecnica costruttiva descritta nel trattato del Maggi e del Castriotto (1564) e riferimento progettuale dei Paleari (Pirinu 2013). L'immagine mostra l'imposta degli archi alla quota del cordone.

Fig. 4
 1-bastione della Maddalena ad Alghero (opera di Capellino);
 2-bastione della Maddalena ad Alghero (opera di G.Paleari);
 3-setti murari presenti nella cortina di San Guglielmo a Cagliari (opera del Capellino);
 4-setti murari presenti all'interno del centro culturale Il Ghetto degli Ebrei (opera del Capellino);
 5-setti affioranti nella terrazza del centro culturale Il Ghetto degli Ebrei e riconducibili all'ampliamento del bastione di Santa Croce (opera di G. Paleari);
 6-struttura riaffiorata nel corso di scavi recenti.

Foto 1, 2, 4, 5, 6 A. Pirinu, foto 3 Archivio Storico del Comune di Cagliari, fondo fotografico

questi ultimi responsabili del disegno definitivo costituito da un baluardo pentagonale con fianco ritirato e parapetto inclinato.

I successivi ampliamenti settecenteschi sono costituiti dalla costruzione del bassofianco e della controguardia, della falsabraga e del tenaglione della Concezione (1727-1733).

In quest'epoca la piazza del baluardo accoglierà inoltre la realizzazione, su progetto dell'ingegnere piemontese Felice De Vincenti, della Caserma San Carlo per la Compagnia dei Dragoni (1723-1736).

Le trasformazioni in atto nel Cinquecento sono rappresentate nelle vedute della città e nei disegni degli ingegneri militari, il completamento settecentesco del sistema difensivo è descritto nella "Pianta della città di Cagliari e dei suoi borghi" ed ulteriori documenti precisano le modifiche che hanno condotto all'attuale assetto; tra questi la carta del Ponsiglione (1822) e una carta redatta dal Genio Civile (1863) ed una mappa Catastale del 1930. La banca dati cartografica selezionata è costituita da elaborati redatti con differente dettaglio; i disegni cinquecenteschi mostrano difatti con poche linee essenziali la modifica della forma del bastione mentre la carta settecentesca – contraddistinta da un disegno più accurato¹⁰- evidenzia l'avvenuta realizzazione della caserma piemontese in collegamento diretto con la cannoniera rivolta verso la fossa di San Guglielmo, del bassofianco e della controguardia.



¹⁰ La carta mostra l'individuazione e il funzionamento dei tracciati murari 'moderni'; si distinguono con chiarezza i profili bastionati, le strade coperte e i fossati, gli accessi dotati di ponte levatoio, le parti posizionate a differenti livelli e le rampe che li collegano, gli spessori murari e il disegno delle troniere e delle panchette lungo le cortine.



Fig. 5 Tunnel voltato nel fianco sud del bastione di Santa Croce a Cagliari (1) e a Peñíscola in Spagna (2). (Foto A.Pirinu)

Il disegno di inizio Ottocento riferisce infine di come gli edifici vadano ad occupare la profondità del parapetto dotato di postazioni per artiglieria – le cui tracce sono ancora leggibili (fig. 8) – e la successiva immagine del 1863 conferma l'avvenuta occupazione del perimetro esterno del bastione cinquecentesco oggetto di indagine geofisica.

Nel corso del Novecento gli edifici presenti nell'area occupata dal bastione – così come il bassofianco piemontese – vengono ceduti a privati e una parte di questi recuperata alla fine degli anni '90 per la realizzazione del centro culturale "Ghetto degli ebrei" che conserva alcuni locali voltati e strutture murarie riconducibili all'opera militare, elementi in parte già oggetto di studio dedicato¹¹.

Il rilievo integrato: procedura operativa e elaborazione dei dati (AP, RB)

Completata l'analisi dei documenti d'archivio il progetto di documentazione ha previsto una serie di operazioni sul campo e un post processamento dei dati finalizzato alla rappresentazione dell'assetto attuale del settore indagato.

La procedura adottata ha consentito di realizzare un inquadramento del complesso monumentale all'interno del contesto urbano e un rilievo del bastione geometricamente affidabile con una restituzione dello stato di fatto finalizzato al confronto stilistico-costruttivo con la trattatistica militare, un'indagine geofisica e geotecnica mirata alla definizione di un modello rappresentativo dello schema strutturale del bastione e alla caratterizzazione del costone roccioso che lo ospita, di individuare alcuni elementi di criticità e rappresentare i risultati attraverso modelli grafici.

A tal fine è stato eseguito un rilievo integrato (strumentale¹² e fotogrammetrico¹³) finalizzato alla verifica dell'affidabilità e affinamento di una recente restituzione aerofotogrammetrica in scala 1:500 resa disponibile dall'Amministrazione Comunale di Cagliari¹⁴. Tale procedura è stata eseguita con l'obiettivo di definire una poligonale d'appoggio funzionale al corretto collegamento del profilo esterno del bastione con le strutture interne e tale da consentirne una corretta lettura degli spessori murari e una corretta interpretazione degli esiti dell'indagine geofisica.

¹¹ Riferibile a una prima catalogazione stilistico costruttiva rispetto alla trattatistica militare e ai canoni costruttivi tipici dei fratelli Paleari (Pirinu 2013, 2014).

¹² Rilievo con stazione totale dei punti rappresentativi della geometria dell'opera e degli edifici sorti nell'area del bastione cinquecentesco.

¹³ L'impiego del rilievo fotogrammetrico ha consentito una solo parziale definizione del modello per la presenza costante di autovetture a ridosso della scarpa del bastione e la presenza – anche molto recente – di ponteggi impiegati per la manutenzione degli edifici sorti lungo il perimetro esterno dell'architettura e la protezione dell'area adiacente al bassofianco (quest'ultimo ancora in loco). I dati ottenuti sono peraltro stati utili per il controllo e la definizione della geometria dell'opera.

¹⁴ Cartografia di base impiegata per l'elaborazione della scheda "Etg 014.B Il sistema della città murata materia, valori, strategie" (Fiorino, Pirinu 2016) nell'ambito della consulenza scientifica alla redazione del Piano Particolareggiato del Centro Storico effettuata dal DICAAR dell'Università di Cagliari.



Fig. 6
Veduta delle fortificazioni di Peñiscola. L'immagine mostra una quota del cordone e dell'imposta degli archi conforme al trattato militare (rif. fig. 3).

pagina a fronte

Fig. 7
troniere settecentesche nel bastione di San Filippo a Cagliari. (Foto A.Pirinu)

La maglia di rilevamento così costituita ha potuto inoltre far affidamento, nell'affinamento del modello digitale¹⁵, sui dati forniti dalle posizioni georeferenziate dei geofoni -distesi lungo la parete ovest del baluardo- impiegati per la tomografia sismica *uphole* (fig. 11) e del GPR -impiegato all'interno delle abitazioni- e accogliere i dati offerti da ulteriori indagini geofisiche¹⁶ che hanno interessato un'area compresa tra la controguardia settecentesca e il piede del bastione.

Le tomografie sismiche eseguite attraverso le mura hanno presentato elementi compatibili con gli esiti degli studi storici e dei rilievi e fornito nuovi spunti per la loro interpretazione e rappresentazione; tra queste, le tomografie CH2, CH6 e CH7 risultano tra le più significative e giacciono su piani verticali che attraversano lo sviluppo delle mura secondo angoli rispettivi di circa 17°, 33° e 47°, le cui posizioni sono evidenziate in figura 12¹⁷.

La tomografia CH2 è mostrata in figura 13; il lato sinistro corrisponde al paramento murario e in basso è riportata la scala cromatica della velocità. È evidente, sulla destra, la transizione dai materiali di riempimento al substrato calcareo naturale che, in accordo con i sondaggi effettuati nel cortile della caserma avviene alla quota di 54-55 m slm.

Spiccano due anomalie: la prima, più piccola, testimonia l'attraversamento di una struttura in elevazione non fondata sul substrato, il cui spessore trasversale rispetto allo sviluppo murario si stima dell'ordine di circa 1 m;

¹⁵In particolare lungo il settore ovest e nel bassofianco.

¹⁶Rilievo con stazione totale dei punti rappresentativi della geometria dell'opera e degli edifici sorti nell'area del bastione cinquecentesco.

¹⁷Tomografia a rifrazione nell'area al piede delle mura (Balìa 2013).

¹⁷La scelta del posizionamento facilita la possibilità di incontrare le strutture a sostegno del terrapieno, in particolare i setti paralleli disposti - come da prassi costruttiva - ortogonalmente rispetto alla perimetria esterna del bastione.



Fig. 8
tracce ancora leggibili delle
troniere nel bastione di Santa
Croce (aperture finestrate nel
fianco sud e nella faccia ovest).
(Foto A.Pirinu)

Fig. 9
condizione di degrado della
faccia ovest del bastione di
Santa Croce a metà degli
anni '70 del Novecento.
(Archivio fotografico del
Laboratorio di Scienze della
Rappresentazione, DICAAR,
Università di Cagliari)

pagina a fronte

Fig. 10
selezione di immagini tratta dal
rilievo fotografico e veduta che
evidenzia il peso paesaggistico
del complesso monumentale
all'interno del sistema urbano.
(Foto A.Pirinu)

la seconda, più corposa, poggia sul basamento restringendosi in alto dove lo spessore stimato è dell'ordine di 2,4 m se la struttura associata si considera con sviluppo parallelo alle mura, ma di soli 0,7 m se lo sviluppo si considera perpendicolare alle mura: nel primo caso può trattarsi del corpo murario e nel secondo di un setto con sviluppo perpendicolare alle mura. La tomografia CH6 (fig. 14) forma un angolo importante (circa 33°) con la direzione dello sviluppo delle mura. Sulla destra, la transizione al substrato naturale si trova alla quota 52-53 m slm.; ancora si nota la struttura "beante" non fondata su roccia e nella parte centrale si trova una struttura artificiale il cui spessore si stima dell'ordine 5 m se si assume il suo sviluppo parallelo alle mura, ma che si riduce a circa 3 m nel caso di struttura perpendicolare alle mura.

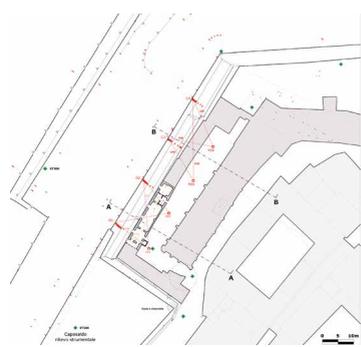
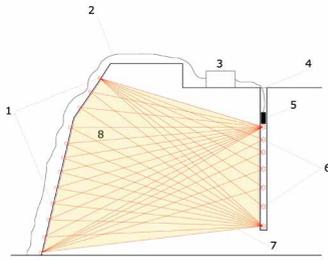
Nella tomografia CH7 (fig. 15) la profondità del substrato, sulla destra, è alla quota di circa 55 m slm. Si nota una sola struttura in elevazione che si restringe verso l'alto, fondata sul substrato calcareo. Lo spessore minimo sti-





Fig. 11
 schema di uphole. 1- geofoni, 2- cavo dei geofoni, 3- apparato acquisitore, 4- foro di sondaggio, 5- sorgente di energia, 6- energizzazioni, 7- raggi sismici. Lo schema chiarisce il "vuoto informativo" in prossimità della quota del cortile della caserma.

Fig. 12
 Schema generale dell'integrazione tra rilievo strumentale e indagine geofisica. Si individua la posizione delle calate G dei geofoni disposti sul paramento, le posizioni dei fori di sondaggio PZ e la posizione delle tomografie CH2, CH6 e CH7. Il tracciato a-a e b-b indica l'area oggetto di indagine con GPR. (Elab. grafica A.Pirinu)



mato è dell'ordine di 0,70/0,90 m; si tratta di uno dei setti, come confermerà l'indagine georadar.

Nel loro complesso le tomografie mostrano una struttura importante associabile al corpo murario vero e proprio che tende a restringersi verso l'alto e un'altra minore che si estende in profondità a partire dal piano di calpestio del cortile dell'ex caserma ma non poggia sul substrato calcareo¹⁸; quest'ultima, come mostrato da scavi effettuati ad hoc (fig. 4), funge – in parte – da fondazione per il muro perimetrale degli edifici oggi presenti lungo il profilo esterno del bastione.

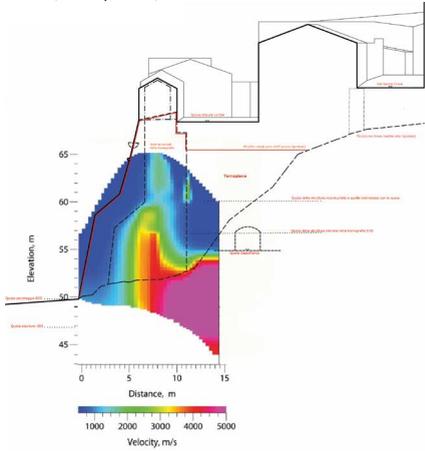
Un'ipotesi plausibile è che la presenza di questa struttura sia da mettere in relazione con una sequenza di arcate disposte anche su più livelli come si osserva nel trattato *Della fortificazione delle città*, Libro II, p.72. Da una parte e dall'altra di questo muro o sequenza di arcate vi sono evidenti riempimenti.

Può sorprendere il fatto che nelle tre tomografie presentate non vi sia traccia del paramento murario che, per quanto visibile dall'esterno, è costituito da blocchi di calcare. Poiché la presenza del paramento è indiscutibile, si è indotti a presumere che il suo spessore sia modesto e variabile, con frequenti scollamenti e riempimenti non compattati tra il paramento stesso e il corpo murario vero e proprio. Le informazioni fornite dalle tomografie conducono ad uno schema strutturale complicato -anche da diversi interventi a causa di instabilità, crolli e ricostruzioni documentate¹⁹-condizione avvalorata anche dal contributo dall'indagine GPR.

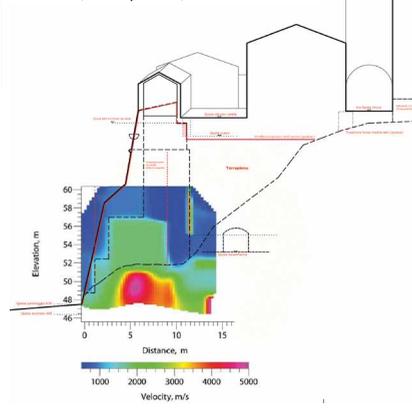
All'interno delle abitazioni e lungo uno stesso profilo parzialmente interrotto per motivi logistici, sono state difatti acquisite due sezioni radar quasi consecutive. Per necessità di sintesi, in figura 16 è riportata l'unione delle due sezioni con la loro possibile interpretazione. È evidente la presenza di strutture il cui tetto è situato circa un metro sotto il piano del pavimento, pressoché coincidente con il piano di calpestio del cortile.

Il segnale è decisamente migliore nella sezione che occupa la parte destra

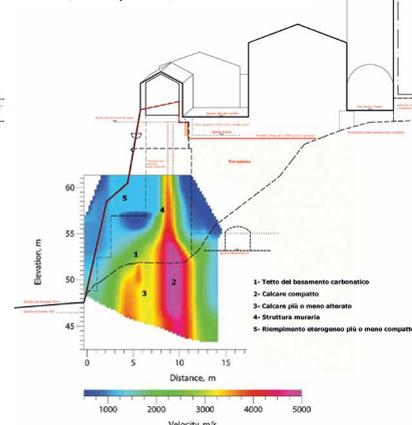
CH2 (Velocity model)



CH6 (Velocity model)



CH7 (Velocity model)



della figura, evidenza che può essere probabilmente attribuita a condizioni sepolte meno caotiche in quel settore, e certamente al fatto che il fondo dell'antenna è stato fatto strisciare direttamente sul pavimento, senza l'apposito carrello.

Nella prima parte, a sinistra, risaltano tre strutture in elevazione ben distinte, con spessore dell'ordine di 60/70 cm ciascuna: esse sono associabili a setti.

Due setti sono individuabili nella seconda parte, sulla destra della figura, dove è evidente un raddoppio dello spessore delle strutture murarie riconducibile alla ricostruzione cinquecentesca e un loro passo differente, come si osserva anche nei documenti d'archivio che descrivono il baluardo di Villanova²⁰ a Cagliari (fig. 18), interessato anch'esso da crolli e ricostruzioni nella seconda metà del Cinquecento.

Definizione e rappresentazione dello schema strutturale (AP, RB)

Le informazioni derivanti dal rilievo integrato hanno permesso di fissare alcuni parametri formali utili alla definizione dello schema strutturale di un settore del bastione di Santa Croce.

L'indagine sismica ha evidenziato la presenza di strutture murarie in prevalenza poggianti su una solida base rocciosa, compatibili con le tecniche costruttive storiche e protette da una camicia esterna che, contrariamente a quanto riscontrato nella piazzaforte di Alghero (spessore costante pari a 3 m), appare di spessore variabile (spessore 1-4 m).

L'indagine eseguita con GPR all'interno delle abitazioni ha permesso di individuare con precisione la posizione dei setti il cui passo riscontrato non è costante, diversamente da quanto verificato nei locali del Ghetto degli Ebrei e nella cortina di San Guglielmo; qui ci troviamo in corrispondenza della facciata che secondo i documenti d'archivio "minaccia rovina e deve essere ricostruita" e l'anomalia riscontrata dal georadar guida verso attribuzione del tratto indagato a quanto ricostruito negli anni 70 del Cinquecento.

pagina a fronte

Fig. 13
proiezione della tomografia CH2 sulla sezione ortogonale B-B.
(Elab. grafica A.Pirinu)

Fig. 14
proiezione della tomografia CH6 sulla sezione ortogonale A-A.
(Elab. grafica A.Pirinu)

Fig. 15
proiezione della tomografia CH7 sulla sezione ortogonale A-A.
(Elab. grafica A.Pirinu)

Fig. 16
Unione delle due sezioni radar. La traccia sovrapposta all'immagine descrive una possibile conformazione originaria della struttura voltata.
(Elab. grafica R.Balia, A.Pirinu)

¹⁸ Nel confronto tra la CH2 e la CH6 osserviamo che la struttura appare interrotta a due differenti quote (rispettivamente + 60 slm, + 55 slm) compatibile con l'andamento del substrato sul quale poggia la faccia ovest del bastione che risulta in risalita nella direzione sud-nord.

¹⁹ "...Il quale baluardo di Santa Croce ha una facciata che minaccia rovina, per cui i parapetti si devono ricostruire di "tierra y faxina", come anche i traversoni "de la misma manera que lo havemos tractado y ordenado Jorge Fratin y yo en p. ntia del Capitán Garçi Xuarez." (Viganò 2004, p.183).

²⁰ Su concessione della Soprintendenza Belle Arti e Paesaggio per la città metropolitana di Cagliari e le provincie di Oristano e sud Sardegna, ARCHIVIO DEI DISEGNI, Mura pisane, Bastione di S. Remi, Pianta e sezioni longitudinali/Sezioni, n°posizione 33, n°ordine 3,4.

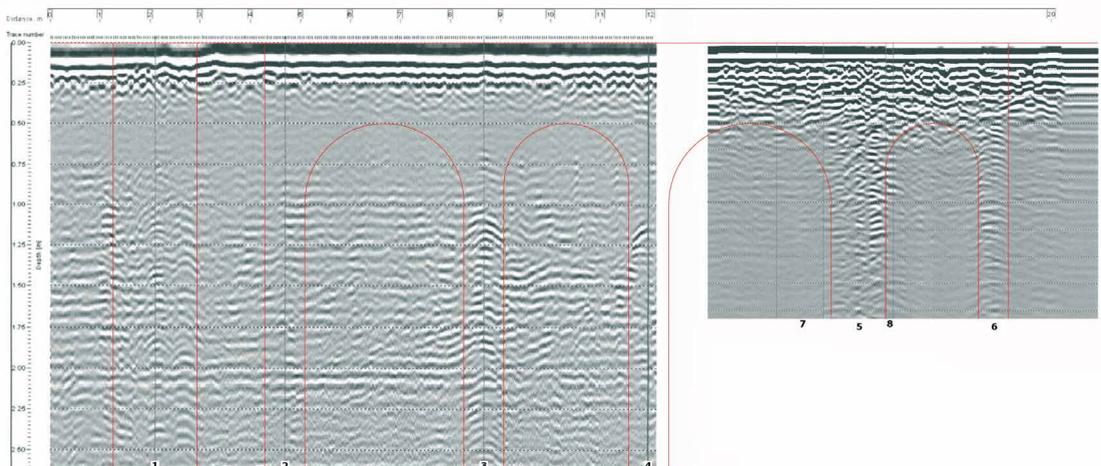


Fig. 17
 disegno del baluardo di Villanova (Archivo General de Simancas. Traça del baluarte de Villa Nova de la Ciudad d[e] Caller q[ue] hirà con las Relaciones del dicho baluarte para maior claridad si fuere minister, MPD_38_074.).
 Si osserva la rappresentazione del profilo con rinforzo alla base - ancora visibile nelle immagini di fine Ottocento - con soluzione formale analoga alla faccia ovest del bastione di Santa Croce.

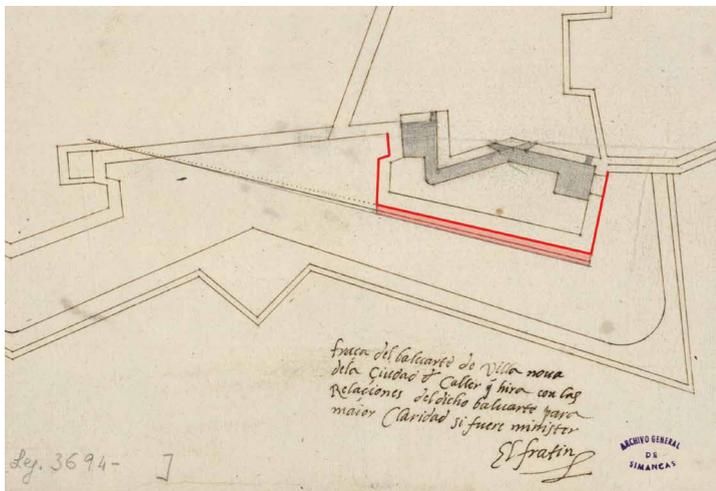
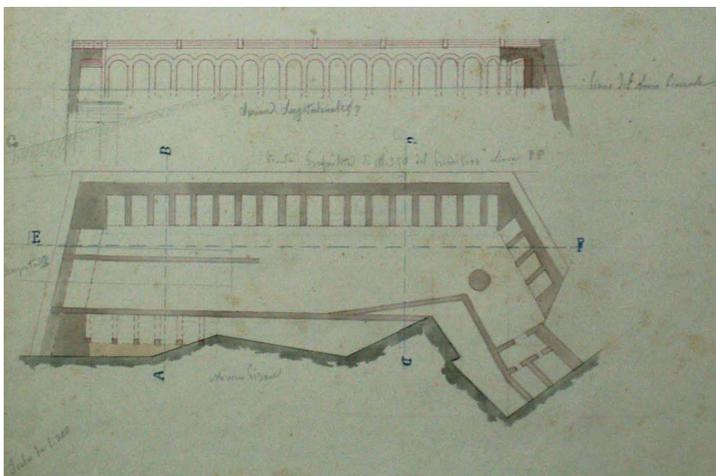


Fig. 18
 Il baluardo di Villanova a Cagliari. La sezione AB mostra la sequenza di archi con passo differente.



pagina a fronte

Fig. 19
 schema planimetrico del settore oggetto di indagine combinata tra GPR e tomografia sismica (piano sezione a quota +1.00 rispetto al piano attuale del pavimento delle abitazioni).

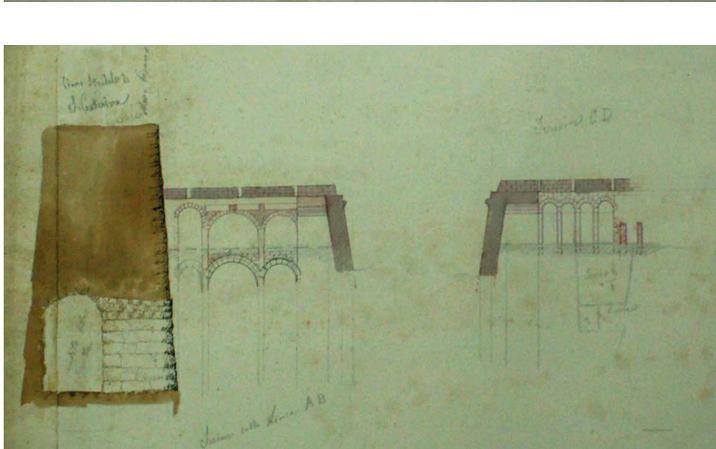


Fig. 20
 schema planimetrico generale delle strutture del bastione cinquecentesco e traccia della linea medievale su base aerofotogrammetrica. (Elab. grafica A.Pirinu)

Fig. 21
 modello 3d rappresentativo del possibile funzionamento dell'opera militare.
 1- percorsi voltati di collegamento tra cannoniera, piazza del baluardo e quota bassofianco e 2- percorsi di contromina normalmente presenti in queste architetture e solo parzialmente individuati dall'indagine. (Elab. grafica A.Pirinu)

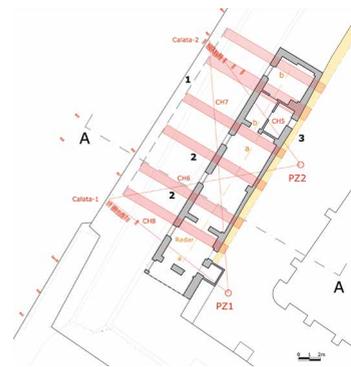
Il georadar non “legge” gli archi; una possibilità è legata alla loro assenza – anche dovuta a interventi recenti da parte dei privati e finalizzati al recupero di spazio abitativo- o alla loro presenza più in profondità rispetto alla quota del pavimento attuale; questa seconda possibilità è avvalorata difatti dagli schemi grafici contenuti nei trattati e dalle opere finora analizzate che mostrano un’imposta degli archi posizionata alla quota del cordone (figg. 3,6) che si trova 3 m più in basso rispetto alla quota del pavimento delle attuali abitazioni, laddove il GPR non fornisce dati.

L’incrocio tra le tomografie e il GPR offre alcuni interessanti risultati; la tomografia CH7 e il GPR “incontrano” uno dei setti a sostegno del terrapieno e poggiate sul costone roccioso, mentre la CH2 e la CH6 intercettano la struttura muraria apparsa nel corso di scavi recenti; tale corpo murario si sviluppa per 18 m senza soluzione di continuità, presenta tracce di intonaco e non corre parallelo alle pareti perimetrali delle abitazioni che prospettano il cortile della ex Caserma che vi si poggiano sono in parte; tale struttura giunge sino a quota 55/60 m s.l.m. compatibile con la posizione del locale voltato individuato alla quota del bassofianco e può essere messa in relazione con le possibili gallerie di contromina spesso presenti nelle architetture militari storiche.

Lo schema strutturale che viene definirsi è costituito pertanto da una successione di setti murari paralleli e a distanza costante (fatta eccezione per il tratto indagato con GPR) collegati da volte disposte anche su più livelli e parzialmente tamponate.

La rappresentazione dei risultati, anche in relazione all’articolazione del complesso indagato, determina la necessità di realizzare – a partire dal database tridimensionale – distinti modelli grafici ciascuno con una differente finalità comunicativa e parte integrante dalla documentazione finale.

A tal fine le tomografie CH7, CH6 e CH2 vengono proiettate sulle sezioni A-A- e B-B costruite a partire dal rilievo strumentale per definire alcune sintesi²¹ (figg. 13,14,15) e integrate da modelli bidimensionali (figg. 19,20) e tridimensionali (figg. 21,22,23,24).



²¹ Le immagini proiettate sono evidentemente più corte delle originali elaborate dal software (ASA, Adaptive Simulated Annealing; alcune applicazioni significative in Ingber, 1996) e potrebbero indurre a non corrette interpretazioni; la loro utilità risiede nell’individuazione corretta dei differenti “strati” attraversati dal segnale ed in particolare della loro posizione altimetrica.

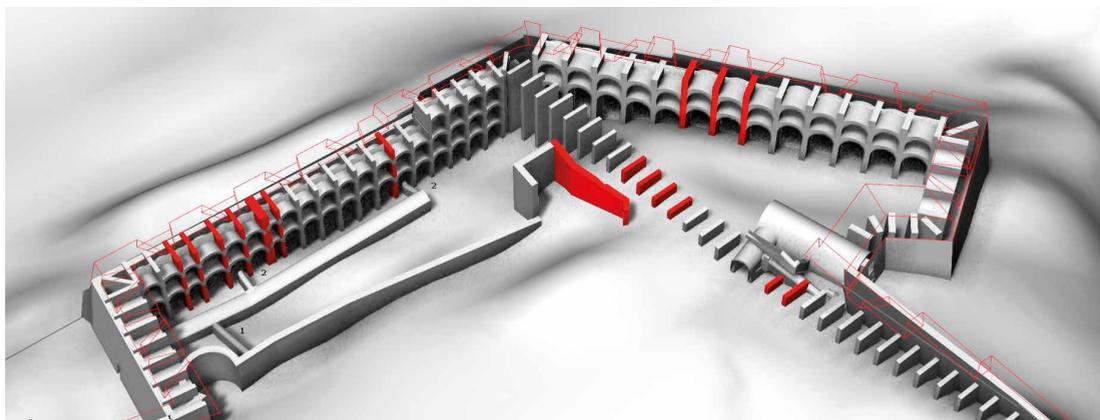


Fig. 22
modello digitale dello stato attuale. Dal basso verso l'alto il solo schema strutturale (setto con rinforzo alla base), modello dell'area di studio realizzata a partire dai dati del rilievo integrato, e quest'ultimo privato della camicia esterna.
(Studio A.Pirinu, elab. grafica M.Utzeri)

Fig. 23
forma settecentesca su base attuale. (Studio A.Pirinu, elab. grafica M.Utzeri)

Fig. 24
principali fasi costruttive del complesso di Santa Croce. (Studio A.Pirinu, elab. grafica M.Utzeri)

Conclusioni (AP, RB)

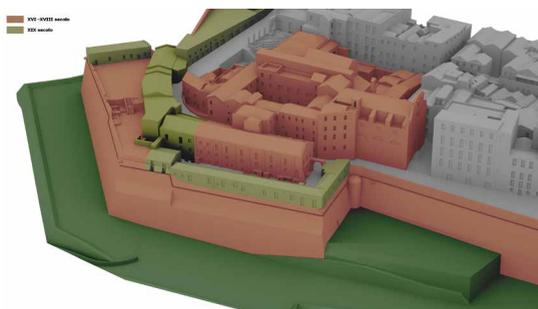
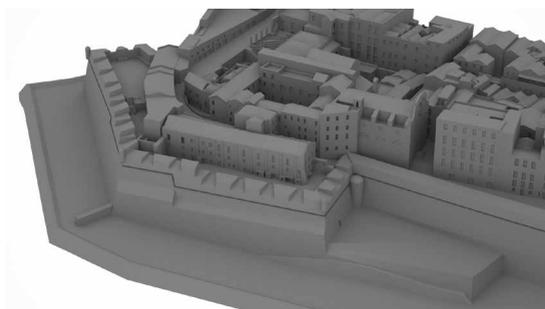
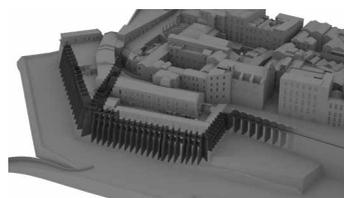
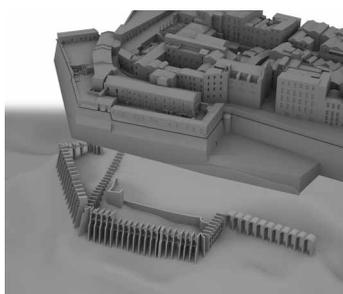
L'integrazione di metodologie di rilevamento e tecniche geofisiche non distruttive ha permesso di approfondire la conoscenza del sistema costruttivo del bastione di Santa Croce a Cagliari.

La metodologia proposta si è rivelata particolarmente utile consentendo di superare i limiti dovuti all'impossibilità di effettuare indagini invasive di notevole impatto e permettendo di acquisire utili informazioni relative alla struttura interna del complesso monumentale.

I dati acquisiti hanno consentito di definire le caratteristiche stilistico-costruttive impiegate per la realizzazione del complesso monumentale, rivelando l'utilizzo di soluzioni differenti da quanto riscontrato sinora nelle piazzeforti spagnole del Cinquecento.

In particolare il tratto del settore ovest del baluardo di Santa Croce oggetto di indagine geofisica ha evidenziato l'impiego di un modello costruttivo differente per sagoma e risposta statica rispetto a quello riscontrato in opere simili realizzate nei diversi cantieri dagli stessi progettisti, di fatto ampliando il repertorio stilistico-costruttivo delle fortificazioni "alla moderna"; si tratta di una soluzione progettuale impiegata nel 1577 nel baluardo di Villanova dagli stessi Paleari e più tardi sempre a Cagliari dagli ingegneri piemontesi sul fronte orientale del quartiere Castello.

L'indagine multidisciplinare -pur con i suoi limiti dovuti all'interpretazione di dati- si è dimostrata pertanto un utile supporto alla ricostruzione delle vicende progettuali di un sito pluristratificato e ha favorito lo sviluppo di un processo conoscitivo attraverso il quale è stato possibile acquisire con una certa sicurezza una serie di informazioni sulle caratteristiche del sistema costruttivo e formulare su di esso alcune possibili ipotesi, contributo necessario per la sua tutela e valorizzazione.



Bibliografia

- Balia R. 2013, *Comparison between ultra shallow reflection and refraction tomography in a geotechnical case-study*, in atti del 32° Convegno Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, vol. 3, pp.12-16.
- Balia R., Pirinu A. 2018, *Geophysical surveying of the ancient walls of the town of Cagliari, Italy, by means of refraction and up-hole seismic tomography techniques*, in «*Archaeological Prospection*», pubblicazione on line 26 febbraio 2018.
- Benedetti B., Gaiani M., Remondino F. (a cura di) 2010, *Modelli digitali 3d in archeologia: Il caso di Pompei*, Edizioni della Normale, Pisa.
- Bini M., Bertocci S. 2017, *Il rilievo per il restauro dei tessuti storici in contesti colpiti da eventi sismici*, in «Disegnare-Con», a cura di Bini M., Bertocci S., *The survey for the restoration of historical heritage*, (vol.10/n.18), pp. 1-4.
- Bini M., Bertocci S. 2012. *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Città Studi Edizioni, Novara.
- Cadinu M., Pirinu A., Schirru M. 2013, *Lecture catastali, rilievi e documenti di architettura per la lettura dell'area di Santa Croce del Castello di Cagliari*, in I catasti e la storia dei luoghi. Cadastres and history of places, a cura di M. Cadinu, in «*Storia dell'Urbanistica*», Annuario nazionale di storia della città e del territorio, anno XXXI, Serie Terza, 4, Edizioni Kappa, Roma.
- Cundari C. 2012, *Il rilievo architettonico. Ragioni. Fondamenti. Applicazioni*, Aracne, Roma.
- Fiorino D.R., Pirinu A. 2017, *Interdisciplinary contribution to the protection plan of the fortified old town of Cagliari (Italy)*, in «*International Journal of Heritage Architecture*», (vol.1/n.2), pp. 163-174.
- Maggi G., Castriotto J. F. 1982 (Ristampa anastatica), *Della fortificazione delle città*, Edizione Jouvence Viella, Padova, Edizione originale ⁽¹⁵⁶⁴⁾, Venezia.
- Martí D., Carbonell R., Flecha I., Palomeras I., Font-Capó J., Vázquez-Suñé E., Pérez-Estaún A. 2008, *High-resolution seismic characterization in an urban area: Subway tunnel construction in Barcelona, Spain*, in «*Geophysics*», (vol.73/n.2), pp. 41-50.
- Milanese M. 2008, *Archeologia postmedievale e storia moderna. Ricerche sulle piazzeforti spagnole della Sardegna nord-occidentale*, in atti del convegno «*Contra Moros y Turcos. Politiche e sistemi di difesa degli Stati mediterranei della Corona di Spagna in Età Moderna*», a cura di B. Anatra, M. G. R. Mele, G. Murgia, G. Serrelli, Edizioni CNR/ISEM, Cagliari, pp. 515-566.
- Orlando L., Cardarelli E., Cercato M., De Donno G. 2015, *Characterization of a pre-Trajan wall by integrated geophysical methods*, in «*Archaeological Prospection*», (vol.22/3), pp. 221-232.
- Ovenden S.M. 1994, *Application of seismic refraction to archaeological prospecting*, in «*Archaeological Prospection*», (vol.1/n.1), pp. 53-63.
- Parrinello S., Pirinu A. 2016, *The documentation of the fortress of Peñiscola: integrated survey for the formal analysis of the defensive system of the historic city*, in atti dell'International Conference on Modern Age fortifications of the western Mediterranean coast, a cura di G. Verdiani, Università degli Studi di Firenze, Firenze, pp.29-36.
- Pancani G. 2017, *Il centro storico di Poppi, analisi a livello urbano per la valutazione del rischio sismico*, in «Disegnare-Con», a cura di M. Bini, S. Bertocci, *The survey for the restoration of historical heritage*, (vol. 10/ n.18), pp. 9.1-9.10.
- Parrinello S. 2017, *La documentazione di al Nabi Musa nel deserto di el-Bariyah, Palestina. Uno studio attraverso il disegno dell'evoluzione storica e delle caratteristiche architettoniche dell'oasi edificata*, in «Disegnare idee immagini», a cura M. Docci, (n° 54 / 2017), Gangemi Editore, Roma.
- Pirinu A. 2013, *Il disegno dei baluardi cinquecenteschi nell'opera dei fratelli Paleari Fratino. Le piazzeforti della Sardegna*, All'insegna del Giglio, Firenze.
- Polymenakos, L., Papamarinopoulos, S., Miltiadou, A., Charkiolakis, N. 2005, *Investigation of the foundations of a byzantine church by three-dimensional seismic tomography*, in «*Journal of Applied Geophysics*», (vol.57/n.2), pp. 81-93.
- Remondino F. 2011, *Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse*, in «Disegnarecon» a cura di E. Ippoliti e A. Meschini, *Tecnologie per la comunicazione del patrimonio culturale*, (Vol. 4/n.8), pp. 90-98.
- Rodríguez-Navarro P. 2017, *Reflexiones sobre el levantamiento arqueológico actual*, in «Disegnarecon», a cura di P. Rodríguez-Navarro, *Archaeological drawing*, (vol.10/ n.19), pp 1-5.
- Sharma P.S. 1997, *Environmental and engineering geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Viganò M. 2004, *El fratín mi yngeniero, I Paleari Fratino da Morcote ingegneri militari ticinesi in Spagna (XVI-XVII secolo)*, Istituto Grafico Casagrande SA, Bellinzona.