

Rilievo 3D e Ricostruzione Digitale della Fortezza di Bergamo: la tenaglia di Sant'Agostino e la cannoniera di San Michele

Alessio Cardaci^a, Pietro Azzola^b, Antonella Versaci^c

^{a,b} Università degli studi di Bergamo, Bergamo, Italia, ^c Università degli Studi di Enna "Kore", Enna, Italia,

^a alessio.cardaci@unibg.it, ^b pietro.azzola@unibg.it, ^c antonella.versaci@unikore.it

Abstract

The Fortress of Bergamo is an imposing architectural construction dating back to the 16th century characterized by a well-preserved city wall and a linear development of over 5 kilometers; in 2017 it was registered in the UNESCO World Heritage Site as a world heritage site. As part of the studies aimed at its conservation and valorization, a pilot project was launched on the gunboat of San Michele, an underground environment on the sides of the bastion and designated for "flanked cannonade" for the defense of the gate of Sant'Agostino on the street for Venice.

The essay aims to illustrate the knowledge project resulting from the historical investigation, the metric-material and diagnostic survey, the graphic processing and the virtual restoration of the models and textures underlying the 3D rendering of the factory. A focus on new technologies aimed at communicating and enjoying cultural heritage resulting from an initial study of documentary sources, followed by precise mapping conducted on digital models, faithful copies of reality thanks to 3D laser scanner technology and HDR photogrammetry. The work allowed us to take an immersive journey in space and time right into the underground walls of the Walls at the end of the sixteenth century, in a virtual tour among bombers and men-at-arms grappling with cannons, fire buttresses, pikes and halberds.

Keywords: drawing, valorisation, preservation, UNESCO World Heritage Site.

1. Introduzione

Il saggio è incentrato sul tema della conoscenza, della documentazione e della valorizzazione della Fortezza di Bergamo; la roccaforte, nota soprattutto per le Mura Veneziane, è un sistema complesso di architetture militari e di spazi - ipogei e di superficie - realizzati secondo uno strategico disegno della Serenissima per la difesa e il controllo dei suoi possedimenti in Terraferma.

L'imponente struttura, conservatasi nei secoli nonostante sia cessata la sua originale funzione, è un luogo fisico che testimonia la storia della città dalla fine dell'epoca medievale ai nostri giorni. Una storia promossa e divulgata per volontà dell'amministrazione cittadina con la creazione di due musei dedicati che raccontano il secolo d'oro della Repubblica di Venezia. Un nuovo modo di

descrivere il passato all'interno di una cornice in grado di coniugare l'architettura antica alla modernità di una narrazione innovativa e originale permessa dalla tecnologia.

Il primo, il "Museo del Cinquecento" inaugurato nel 2012 all'interno del Palazzo del Podestà, propone un percorso dedicato alla Bergamo rinascimentale attraverso animazioni grafiche e mappe interattive che restituiscono la vita culturale, politica ed economica della città (fig. 1a). Il secondo, "Le Mura di Bergamo: il Museo", inaugurato nel settembre del 2024 presso la porta di Sant'Agostino, illustra le vicende cardine dell'edificazione della fortezza, restituendo l'esempio bergamasco all'interno del più ampio contesto dei forti 'alla moderna'. Entrambi gli

allestimenti hanno una doppia anima: da un lato quella più tradizionale con l'esposizione di dipinti, strappi d'affresco, armi e armature, trattati, carte geografiche, disegni e manoscritti; dall'altro l'anima più moderna e tecnologica con postazioni digitali, videoproiezioni, ricostruzioni 3D e grandi sale immersive dedicate alla storia del cantiere che ha modificato il volto e l'essenza della città sul colle (Fig. 1).

Un programma ambizioso avviatosi in occasione della preparazione del dossier necessario alla candidatura UNESCO; un impegno che ha visto l'attiva collaborazione dell'Università degli Studi di Bergamo, in particolare dello staff del laboratorio S.A.B.E. (*Survey & Analysis of Built Environment*), nonché di studiosi di altri atenei italiani. Negli ultimi anni un nuovo intendimento del monumento è stato possibile grazie alla rilettura delle fonti archivistiche e alle recenti indagini metrico-materiche e dello stato di conservazione dell'intero perimetro dei fronti della cinta muraria, del baluardo di Valverde, della porta e del bastione di San Lorenzo, della c.d. 'polveriera superiore' di San Marco (in verità correttamente da appellare come 'Torresino da Polvere' del forte di San Marco), della cannoniera di San Michele e, non in ultimo, della 'tenaglia' di Sant'Agostino (Cardaci & Versaci, 2023); faranno seguito nuove ricerche riguardanti il baluardo e la cannoniera di San Giovanni e la porta di Sant'Alessandro.

Tasselli di un grande puzzle che hanno dato vita al progetto di conoscenza e valorizzazione del sito "PanoramaMura"; un viaggio in dieci tappe (intese come aree espositive di un unico grande museo) della poderosa fortezza che torna ad essere protagonista come luogo di scoperta, di visita, di conoscenza e di emozione. Una serie di interventi che realizzano l'idea dell'architetto restauratore Sandro Angelini che, conscio dell'importanza della salvaguardia dell'intero organismo (fatto, quindi, anche di piccoli episodi singolarmente poco significativi ma di grande valore per la corretta comprensione di un sistema univoco), presentò negli anni Ottanta del secolo scorso una proposta di museo diffuso all'interno del suo piano di risanamento conservativo per Città Alta, purtroppo non realizzata (Scarrocchia 2022). Un insieme di spazi espositivi allestiti, sia *en plein air* sia all'interno delle antiche strutture, connettendo una rete di percorsi snodati sopra le mura, ai piedi dei baluardi, all'interno delle cannoniere e utilizzato le 'sorterie'.



Fig. 1- Le sale immersive delle "Mura di Bergamo: il Museo" e del "Museo del Cinquecento".

Le Mura Veneziane di Bergamo, inserite nella lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO il 9 luglio 2017, stanno per celebrare il decennale del prestigioso riconoscimento. L'appuntamento del 2027 vede sin d'ora coinvolte le istituzioni cittadine nella pianificazione congiunta di una serie di eventi (installazioni, conferenze, attività educative, artistiche e culturali, ...) per rivalutare la ricchezza storica, culturale e architettonica del sistema difensivo. Un'occasione importante in cui saranno resi fruibili i luoghi ancora inaccessibili e sarà completato il modello complessivo atto a restituire l'immagine della fortezza alla fine del Cinquecento.

2. La tenaglia di Sant'Agostino e la cannoniera di San Michele

La comprensione di un bene monumentale, oltre alla visita fisica *in situ*, è possibile se la fabbrica è raccontata e narrata nei suoi antichi fasti e nella sua evoluzione storico-costruttiva; è quindi necessario che sia svelata – attraverso la disciplina del Disegno nella sua espressione più avanzata e tecnologica (rilievo 3D, ricostruzioni tridimensionali fotorealistiche, animazioni e visite immersive *virtual reality*) – la dimensione invisibile e nascosta alla percezione diretta. Il

progetto della tenaglia di Sant'Agostino (inteso non solo come recinto difensivo ma quale insieme organico di varie fabbriche: dall'ex-convento, alla chiesa, alla porta, alle cannoniere e all'insieme infrastrutturale di accesso) influenzò fortemente il disegno delle possenti mura (Fig. 2). Il complesso religioso e le sue pertinenze, diversamente da altri importanti edifici di culto della città, non vennero demoliti ma annessi e racchiusi (sia per la forte influenza dei Padri Agostiniani, sia grazie al pagamento di una consistente somma di denaro) all'interno di un nuovo tracciato della fortificazione. La variante ebbe, come conseguenza, un allargamento della cinta verso sud-est che richiese la costruzione di altri due 'artigli difensivi' verso la pianura (oltre al bastione di Sant'Agostino, quelli attigui di San Michele e 'del pallone'), nonché la realizzazione di una maestosa ed imponente porta sulla via per Venezia (Colmuto Zanella 1988). Quest'ultima, nel suo aspetto, venne arricchita con la costruzione in asse di una fontana, anch'essa tripartita come il varco nelle mura, e aggraziata nell'aspetto dal raffinato contrasto cromatico tra la pietra scura di Sarnico – della struttura in alzata – e il marmo bianco di Zandobbio – delle nicchie e delle rientranze. Nel corso dei secoli la tenaglia ha modificato il suo aspetto nativo a seguito delle numerose trasformazioni urbane e del riuso delle architetture che rendono, oggi, difficile l'intendimento dell'aspetto originale del XVI secolo (Fig. 3).

Il laboratorio S.A.B.E. ha iniziato, nel corso del 2022, la ricostruzione digitale di modelli immersivi atti a condurre il visitatore in un viaggio nello spazio e nel tempo che, attraverso il confronto con l'antico, permetta di comprendere l'oggi e meglio apprezzare le testimonianze materiali ancora superstiti. La sperimentazione è stata condotta sulla cannoniera di San Michele, la 'postazione da fuoco' per la difesa della porta da sud-ovest.

Il progetto ha voluto ampliare l'intendimento, attraverso la documentazione digitale, di questi luoghi densi di cultura e di storia. Il baluardo di San Michele è stato scelto quale caso significativo per spiegare e divulgare il complesso apparato di difesa della fortezza, realizzato con una sinergica rete di artiglierie, sia ipogee che di superficie. È stata indagata e comunicata la morfologia degli spazi, la matericità delle superfici e la fisicità dei volumi; è stata scandagliata la vita all'interno delle mura



Fig. 2- La tenaglia di Sant'Agostino (elaborazione a cura di S.A.B.E.).

con un focus sulle armi e all'artiglieria cinquecentesca. Il progetto si è posto l'obiettivo di restituire 'visioni' del forte in un preciso momento storico, il XVI secolo, sia per poter esporre immagini di una realtà poco nota ai più, sia al fine di disporre di materiali importanti per l'artefatto digitale. Il risultato è stato perseguito attraverso specifiche azioni: il rilievo geometrico-materico del baluardo e dei suoi sotterranei (Fig. 4), la modellazione 3D delle antiche architetture e la narrazione per mezzo di un cortometraggio.

Il progetto è stato supportato dai risultati delle ultime ricerche scientifico-documentarie che hanno guidato le fasi di ricostruzione affinché i prodotti realizzati non fossero una fantasiosa invenzione ma una restituzione coerente del passato, fondata sulla digitalizzazione e sul restauro virtuale dell'esistente per discernere tra l'originale e la superfetazione. Il *Video-Rendering* non è una semplice ricostruzione virtuale, ma uno studio innovativo nel campo della rappresentazione del patrimonio; le tessiture murarie, gli arredi e le stesse armi che i visitatori hanno modo di osservare sono infatti scansioni 3D di parti del bastione e di pezzi della collezione permanente del museo. Il modello virtuale e la realtà sono stati legati da un binomio



Fig. 3- La porta Sant'Agostino in 3D (elaborazione e restituzione grafica di S.A.B.E.).

indissolubile che ha reso il progetto un caso studio di particolare interesse.

3. La costruzione dello spazio virtuale

La creazione dell'artefatto digitale è iniziata con il *3D Modeling & Texturing* a cui ha fatto seguito la narrazione visuale attraverso il *Video-Rendering*. Un workflow che ha impiegato differenti tecniche e diversi software al fine di integrare i modelli fotogrammetrici dello spazio ipogeo della polveriera con gli armamenti, le figure dei soldati e gli oggetti ormai scomparsi. La modellazione ha richiesto un approccio multi-scalare e tre differenti tecniche ricostruttive: il *3D Image-Based Modeling*, il *Direct Geometric Modeling* e il *Procedural Modeling* (Zeman, 2014).

La ricostruzione *3D Image-Based Modeling* si è basata sull'utilizzo congiunto di tecniche fotogrammetriche, sia con sensori passivi che con sensori attivi, per realizzare copie digitali delle architetture esistenti e degli oggetti oggi esposti nei musei cittadini. La *Direct Geometric Modeling* ha consentito, invece, la creazione di manufatti ed utensili *ex-novo* da immagini di archivio e descrizioni contenute negli antichi manuali; tutto questo a partire da primitive 3D o elementi estratti con processi di estrusione e di rivoluzione di figure piane. Il *Procedural Modeling*, in ultimo, ha permesso di realizzare le figure umane grazie a generatori parametrici *soft-*

body semi-automatici in grado di controllare la corporatura e le pose dei personaggi (Figg. 4-8).

I modelli poligonali sono stati quindi migliorati con tecniche *3D Sculpture*; la scultura digitale consente la modifica puntuale della mesh utilizzando dei pennelli, variabili in dimensione e funzione, che interagendo con la superficie realizzano protrusioni, avvallamenti, scalfitture e incisioni (come se si stesse lavorando su un pezzo di argilla). Questo ha permesso di velocizzare le modifiche ma, di contro, ha aumentato il numero dei triangoli; è stato quindi necessario diminuire la complessità del modello campionandolo e affidando alle mappe di *bump* il compito di preservare e garantire la riproduzione dei dettagli e delle asperità. La ri-proiezione *bump mapping* ha consentito, infatti, di rappresentare le irregolarità delle superfici senza alterare la geometria del modello (Cardaci & Versaci, 2013).

Oggetti e uomini sono stati quindi posizionati all'interno dello spazio della polveriera al fine di essere presentati in un unico contesto scenografico e con la stessa illuminazione. La scena è un'installazione dinamica che muta nel tempo perché si modificano le inquadrature, le luci e, in più, la percezione spaziale è influenzata dall'aberrazione delle ottiche e dal movimento delle camere. Essa ha 'preso vita' con il *Video-Rendering*, inteso come il processo che dona un effetto fotorealistico a persone ed oggetti mostrandoli lentamente nel tempo e da differenti

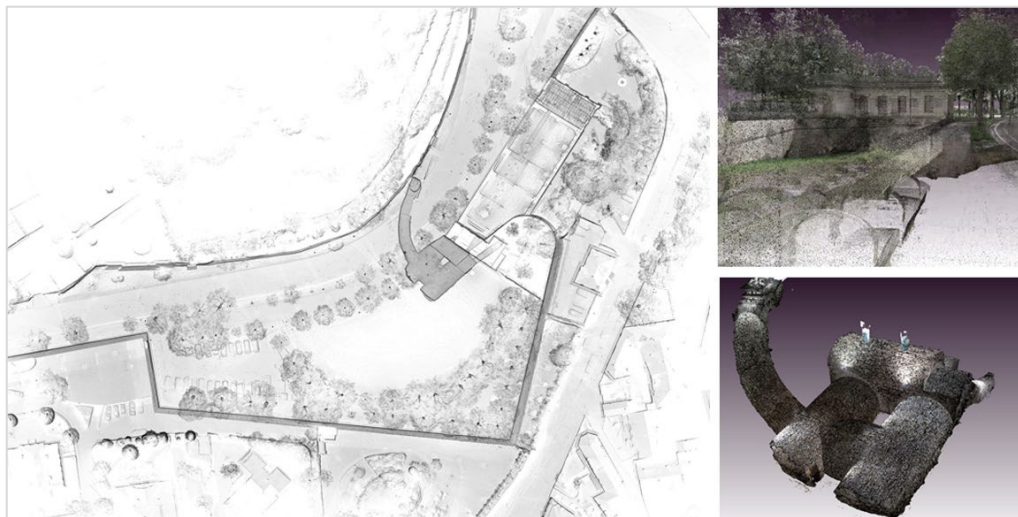


Fig. 4- Il rilievo della tenaglia di Sant'Agostino con la porta e la cannoniera (elaborazione e restituzione grafica di S.A.B.E.).



Fig. 5- Il rilievo degli armamenti (foto a cura di S.A.B.E.).

punti di vista. Il tradizionale *shading* – ovvero la variazione omogenea di colore e luminosità delle singole facce in relazione alla luce incidente, all’angolo di osservazione e alla riflessione in ragione delle caratteristiche dei materiali) – è stato migliorato con il *texture mapping*, ovvero la sovrapposizione di immagini *raster* (ricavate dai modelli fotogrammetrici) sulla geometria poligonale del modello. La narrazione è stata affidata non a singole immagini ma a un cortometraggio al fine di sfruttare la relazione tra le componenti visive, uditive e temporali caratteristiche di una rappresentazione 4D. È stato scelto di descrivere la cannoniera e i suoi

personaggi con la tecnica del *plan-séquence* – ossia una storia visuale attraverso una sola ripresa senza soluzione di continuità – perché ritenuta più adatta a riprodurre la ‘realtà’, senza le influenze tipiche del montaggio cinematografico che condizionano la visione dello spettatore suscitando un’emotività voluta dal regista (Bazin, 1999). Il film è una sequenza di immagini correlate che ‘rendono’ l’azione della scena e lo spazio è svelato poco per volta attraverso il movimento della camera, collocata ad ‘altezza uomo’, che accelera e rallenta in ragione del ritmo del brano musicale che la accompagna. La traiettoria è stata impostata su *keyframe* strategici



Fig. 6- Il rilievo degli armamenti (elaborazione e restituzione grafica di S.A.B.E.).

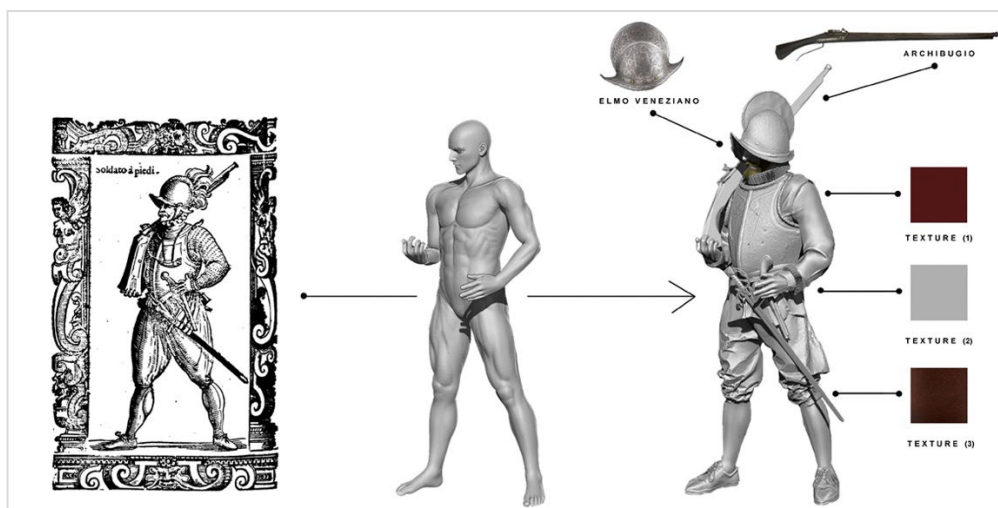


Fig. 7- La modellazione dei soldati dalle studio delle fonti archivistiche (elaborazione grafica di S.A.B.E.)

e rappresentativi della scena (fig. 9); sono state scelti le inquadrature in modo da enfatizzare i particolari delle architetture e le pose dei personaggi. In post-produzione sono stati impiegati particolari filtri per correggere errori di modellazione o aggiungere effetti di luce (la polvere dopo lo scoppio del cannone o la fiamma delle torse) particolarmente difficili da restituire direttamente in 3D. L'esecuzione meccanica di passaggi tecnici non assicura automaticamente ricostruzione digitali coerenti e corrette. L'uso adeguato della tecnologia è un presupposto fondamentale affinché la narrazione *Video-Rendering* sia chiara e facilmente interpretabile ma, focalizzarsi esclusivamente sugli aspetti

tecnici dello strumento rischia di limitarne le potenzialità espressive e le capacità analitiche dell'autore. I recenti motori grafici – ad esempio EpicGames Unreal Engine – offrono oggi straordinarie potenzialità fotorealistiche ma le immagini prodotte si collocano sul confine tra illusione e realtà; queste ultime, pur presentando un alto valore di realismo, non sono comunque fotografie (quindi catture coerenti dell'esistente) ma forme di pittura digitale e, quindi, pongono all'osservatore il dubbio di trovarsi di fronte a una figurazione che non costituisca una verità assoluta ma una artefatta testimonianza della realtà; come la pittura tradizionale un *render* è sottoposto al giudizio dello spettatore che può



Fig. 8- Il rendering e lo studio delle pose dei soldati (elaborazione grafica di S.A.B.E.).

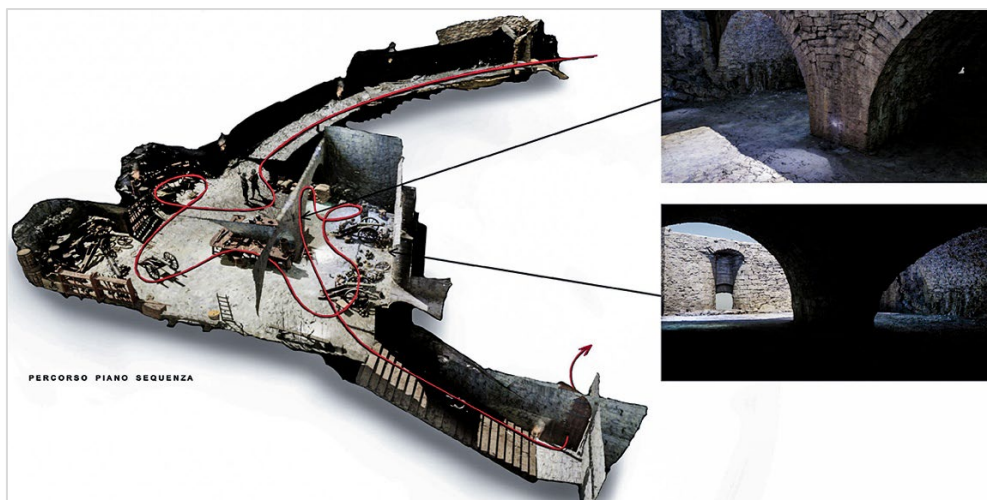


Fig. 9- La costruzione scenografica e il movimento della camera per il *plan-séquence* (elaborazione grafica di S.A.B.E.).

interpretarlo come un disegno d'invenzione. Questo perché, nonostante i soggetti rappresentati si configurino come verosimili, essi sono tutt'altro che naturali e interpretati "nel modo in cui in cui si elabora la figurazione di un ricordo" (Vidler, 2009, p.84).

La finalità della ricostruzione virtuale della cannoniera di San Michele non è stata quindi la ricerca di un fotorealismo estremo ma una narrazione per immagini in gradi di 'vedere' il presente e 'immaginare' il passato, dove (Fig. 10)

"le figure, i paesaggi e gli oggetti richiamano la visione naturale [riconducendo] tuttavia ad una scelta fra tante" (Falcinelli, 2020, p.157), non per forza la più corretta ma la più convincente.

4. Conclusioni

Il progetto, ancora in itinere, ha come obbiettivo finale la realizzazione di un sistema di AR che permetterà al visitatore di 'vedere' nello stesso istante l'ipogeo sia come appare oggi che nel passato. Questo anche al fine di riconoscere l'originalità di molti elementi architettonici e



Fig. 10- Un'immagine estratta del Video-Rendering (elaborazione grafica di S.A.B.E.).

costruttivi che si sono conservati nei secoli e meritano di essere ‘visti’ con particolare attenzione e rispetto per comprenderne l’antica funzione.

Notes

Lo studio è stato condotto nell’ambito del progetto di P.E. “Le Mura si fanno museo: la tenaglia di Sant’Agostino luogo nevralgico della Fortezza di Bergamo” promosso dal

Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate (DISA) dell’Università degli Studi di Bergamo con la collaborazione del Museo delle Storie di Bergamo. Si ringrazia la direttrice, la dott.ssa Roberta Frigeni, e il suo staff per il prezioso aiuto. Gli autori ringraziano il Segretariato UNESCO del Comune di Bergamo nelle figure del dott. Claudio Cecchinelli e della dott.ssa Laura Ciccarelli.

Bibliografia

- Bazin, A. (1999) *Cosa è il cinema* (trad. A. Aprà). Milano, Bompiani.
- Cardaci, A. & Versaci, A. (2013) Image-based 3D modeling vs laser scanning for the analysis of medieval architecture: the case of St. Croce church in Bergamo. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. retrieved from <http://hdl.handle.net/10446/32021>
- Cardaci, A. & Versaci, A. (2023) La Fortezza di Bergamo: un patrimonio militare da rileggere e conservare. The Fortress of Bergamo: a military heritage to be re-read and preserved. In: *Città e Guerra: difese, distruzioni, permanenze delle memorie e dell’immagine urbana*. Napoli, Edizione FedOA-Federico II University Press, pp. 27-36.
- Colmuto Zanella, G. (1988) Le mura. In: *Progetto: il colle di Bergamo* (a cura di L. Pagani). Bergamo, Pierluigi Lubrina Editore, pp. 61-70
- Falcinelli, R. (2020) *Figure: come funzionano le immagini dal Rinascimento a Instagram*. Torino, Einaudi.
- Scarrocchia, S. (2022) *Sandro Angelini: architetto in Bergamo e conservatore internazionale nel secondo Novecento*. Milano, Mimesis.
- Vidler, A. (2009) *La deformazione dello spazio: arte, architettura e disagio nella cultura moderna* (Trad. M. Laera). Milano, Postmedia.
- Zeman, N. B. (2014) *Essential Skills for 3D Modeling, Rendering, and Animation*. New York, Taylor & Francis CRC Press.