

Modellazione algoritmica per il processo *Scan-to-FEM* di un sistema voltato complesso

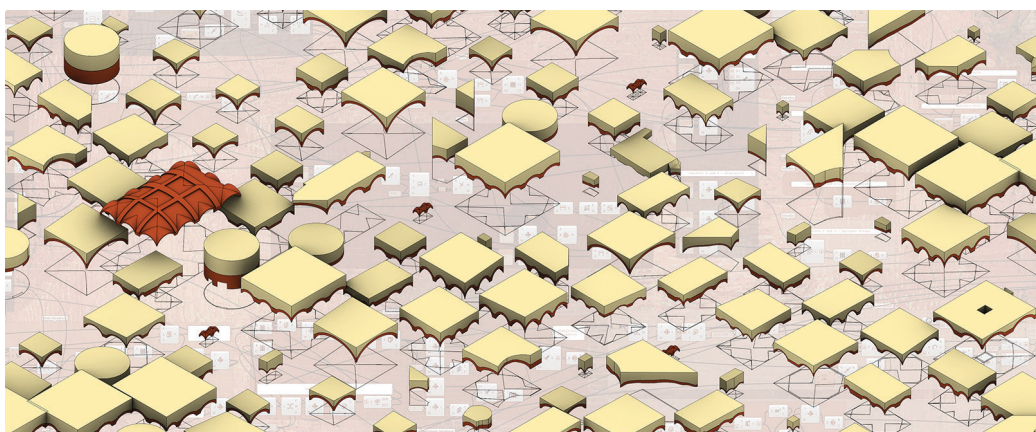
Giulio Lucio Sergio Sacco
Carlo Battini

Abstract

Questo lavoro presenta l'applicazione di un approccio semiautomatico per la gestione del processo *scan-to-FEM* del sistema voltato del Castello Doria Malaspina di Calice al Cornoviglio, focalizzandosi sulla modellazione delle volte a crociera e delle volte a botte con testa di padiglione lunettate. La metodologia di modellazione presentata si basa sul rilievo a nuvola di punti e utilizza la modellazione parametrica *Visual Programming Language* (VPL) che, con un ridotto numero di *input*, ha permesso di generare modelli solidi che includono sia la struttura vera e propria delle volte che il loro riempimento. I parametri geometrici principali, e in particolare la freccia di ciascuna generatrice, sono automaticamente ottenuti dall'elaborazione della nuvola di punti, riducendo significativamente la necessità di intervento manuale nella modellazione. L'applicazione di questo approccio al caso studio ha mostrato come la modellazione parametrica consenta di ridurre notevolmente i tempi e mitigare possibili errori, consentendo l'implementazione in modelli FEM di geometrie complesse in tempi contenuti, anche considerando l'investimento di tempo iniziale per l'implementazione VPL. I modelli ottenuti, oltre che per l'analisi strutturale, potrebbero essere applicati anche per la documentazione e la gestione del patrimonio architettonico in ambiente HBIM.

Parole chiave

Modellazione parametrica, *Scan-to-FEM*, nuvola di punti, volte in muratura, VPL.



Volte generate automaticamente tramite algoritmi VPL (elaborazione degli autori).

Introduzione

Con l'introduzione delle moderne tecniche di rilievo digitale è aumentata la richiesta di una accurata rappresentazione dello stato di fatto del patrimonio architettonico, soprattutto nell'ambito della conservazione degli edifici storici. Ciò è vero sia nell'ambito dell'analisi storico-interpretativa [Jobbik, Eszter 2023, pp. 115-137] e della rappresentazione dell'architettura [Capone, Lanzara 2021, pp. 107-114; Bagnolo, Argiolas, Vanini 2022, pp. 147-166; Natta 2023, pp. 381-387; Aliberti, de-Miguel-Sánchez, González-Uriel 2024, pp. 593-608] che nei campi del restauro e della conservazione e dell'analisi strutturale [Barazzetti *et al.* 2015, pp. 71-87; Angjeliu Cardani, Coronelli 2019, pp. 1-17]. Le nuvole di punti prodotte attraverso tecniche *laser scanner* e *structure-from-motion*, pur rappresentando in modo accurato e ricco di informazione geometrica le superfici visibili degli oggetti rilevati, richiedono spesso un'interpretazione critica del dato e la sua conversione in modelli tridimensionali che permettano l'interoperabilità e una fruizione efficace da parte delle diverse figure professionali coinvolte [Barazzetti 2016, pp. 298-311]. Per applicazioni come la modellazione BIM o l'analisi strutturale, sono spesso richieste rappresentazioni sintetiche e realistiche in grado di raccogliere il maggior numero di informazioni. Nel caso delle volte, può essere necessario descriverne la struttura interna, la divisione in elementi architettonico-strutturali e così via, anche sulla base dei dati ricavati da analisi conoscitive *in situ*. Questa necessità, unita agli ingenti costi della modellazione manuale, ha fatto crescere l'interesse verso una rappresentazione parametrica dell'architettura, in grado di descrivere gli elementi architettonici sulla base di alcuni parametri salienti e algoritmi generativi. Le volte in muratura sono uno dei più importanti elementi architettonici e strutturali del patrimonio storico europeo e, probabilmente, quelli che hanno beneficiato maggiormente delle possibilità di studio offerte da questi approcci. In letteratura sono presenti diversi esempi di modellazione parametrica di volte in ambiente BIM, sia attraverso implementazioni VPL [Capone, Lanzara 2021, pp. 107-114; Quattrini *et al.* 2019, pp. 957-964] che attraverso famiglie adattive [Buldo *et al.* 2023, pp. 333-340] e *add-in* [Banfi 2019, pp. 139-146]. Le stesse tecniche sono state usate per sviluppare approcci *scan-to-FEM*, sia per la creazione di superfici [Argiolas *et al.* 2019, pp. 125-132] che solidi [Angjeliu, Cardani, Coronelli 2019, pp. 1-17]. Il presente lavoro si colloca nell'ambito di una ricerca interdisciplinare [Boato, Calderini, Ferrero 2023, pp. 530-538] finalizzata alla conoscenza e conservazione del Castello Doria Malaspina di Calice al Cornoviglio (La Spezia), di seguito il 'Castello'. Quest'ultimo è un imponente edificio a pianta irregolare di quattro piani, corredato da due torri circolari, che ha attraversato numerose fasi costruttive tra il XIII e il XX secolo (fig. 1). Le partizioni orizzontali, ad eccezione di due interventi moderni a seguito di crolli, sono realizzate mediante volte in muratura con riempimento. Crociere e botti con teste di padiglione lunettate, di seguito 'volte lunettate', sono le più impiegate; sono presenti anche cupole, botti lunettate, botti rampanti e coperture irregolari (fig. 2). La ricerca qui presentata nasce dalla volontà di realizzare un modello tridimensionale agli elementi finiti del Castello, al fine di condurne un'analisi strutturale e sismica [Ferrero, Sacco, Calderini 2025, pp. 411-419]. Considerata l'impossibilità materiale di una modellazione manuale, eccessivamente lunga soprattutto a causa delle strutture voltate [Ursini *et al.* 2022, pp. 1-14], si è deciso di esplorare un approccio VPL per la loro modellazione.

Metodologia

Il dibattito sulla geometria di progetto delle volte a crociera è da sempre molto vivace, sia nel merito delle possibili geometrie delle unghie [Gaetani *et al.* 2015, pp. 841-856], che riguardo le tessiture murarie, quanto per gli aspetti di messa in opera. Tale discussione emerge nella trattatistica [Capone, Lanzara 2019, pp. 219-226] e nel rilievo degli edifici storici, dove si riscontrano specifiche geometrie [Bagnolo, Argiolas, Vanini 2022, pp. 147-166] e tessiture. Questi tre aspetti (forma, tessitura e messa in opera) sono legati da un rapporto di interdipendenza e la scelta di uno dei tre ha, spesso, implicato lo sviluppo o l'adozione degli altri due. Un discorso analogo vale anche per le volte lunettate, dove,



a)



b)

Fig. 1. Castello Doria Malaspina: a. vista Nord-Est; b. nuvola di punti (elaborazione degli autori).

tuttavia, esiste una maggiore variabilità delle forme e delle tecniche costruttive, in parte dovuta alla maggiore complessità geometrica che permette più variazioni sul tema. A questi problemi teorici e progettuali si aggiungono le inevitabili discrepanze tra progetto e messa in opera, particolarmente evidenti in fabbriche di minore importanza, nonché le variazioni geometriche dovute a interventi successivi e ai danni accumulatisi nel tempo, che contribuiscono a creare una discrepanza, talvolta significativa, tra l'opera concepita e quella giunta fino a noi.

La scelta della geometria con cui rappresentare elementi architettonici complessi non è quindi né semplice né univoca. Nel contesto della modellazione geometrica finalizzata all'analisi strutturale, in particolare alla modellazione agli elementi finiti, è necessario considerare se tener conto delle deformazioni accumulate dall'edificio, riconducendosi eventualmente al tema dell'identificazione della geometria di progetto, e quale livello di dettaglio adottare (*level of geometry* o LOG, secondo la terminologia BIM). Infine, occorre considerare le esigenze specifiche dei *software* usati per le analisi numeriche, soprattutto per garantire la generazione di *mesh* FEM di buona qualità e la coerenza geometrica tra elementi strutturali adiacenti. In questo ambito, il ruolo del disegno e di un'accurata rappresentazione 3D è cruciale al fine di limitare problemi numerici e di modellazione strutturale. Per tali motivi, considerando le incertezze legate al tema e la necessità di sviluppare un approccio semplice che riduca al minimo i tempi di modellazione, si è adottata la soluzione di modellare le volte nella loro configurazione attuale, semplificandone le forme laddove



Fig. 2. Esempi delle tipologie di volte presenti nel castello (elaborazione degli autori).

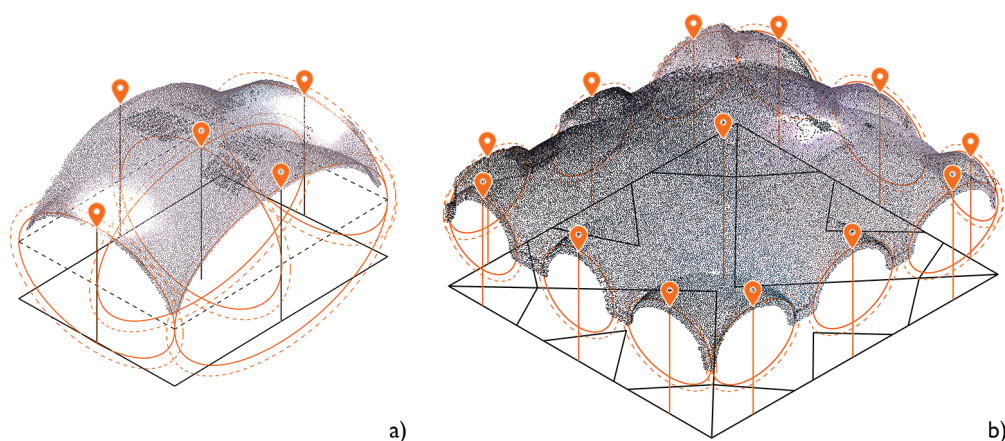


Fig. 3. Campionamento della nuvola di punti per la definizione delle generatrici: a. volta a crociera; b. volta a lunette (elaborazione degli autori).

possibile. In particolare, si è scelto di evitare approcci di *shape fitting* [Lanzara, Samper, Herrera 2019, pp. 645-652; Bolognesi, Stancato 2021, pp. 1-11], o una accurata modellazione per sezioni [Aliberti, de-Miguel-Sánchez, González-Uriel 2024, pp. 593-608], preferendo adottare una modellazione semplificata a partire da un limitato numero di parametri geometrici ottenuti attraverso la campionatura di specifici punti all'interno della nuvola (fig. 3). Per esigenze di modellazione strutturale si è distinta la struttura vera e propria della volta in muratura, di moderato spessore, dal riempimento, privo di funzione strutturale. Solo le superfici di intradosso delle volte sono state modellate sulla base della nuvola di punti, mentre le superfici di estradosso, per le quali è stata comunque necessaria una modellazione esplicita, sono state derivate dalle generatrici dell'intradosso e dello spessore strutturale rilevato *in loco* tramite endoscopie. Il riempimento è stato modellato a partire dalla superficie dell'estradosso, colmando il volume rimanente fino al piano di calpestio del livello superiore. I peducci delle volte sono stati tagliati al fine di evitare problemi di *meshing* dovuti alla presenza di spigoli molto accentuati, che avrebbero creato artefatti nel modello finale. Gli algoritmi di modellazione parametrica sono stati implementati in *Grasshopper* per

Fig. 4. Output degli algoritmi VPL, modelli geometrici NURBS di volte e riempimenti: a) volta a crociera; b) volta a lunette (elaborazione degli autori).

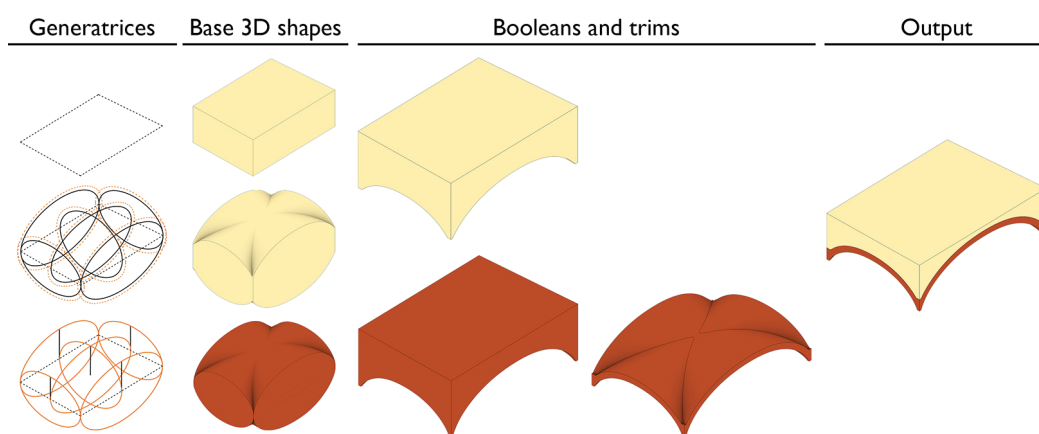
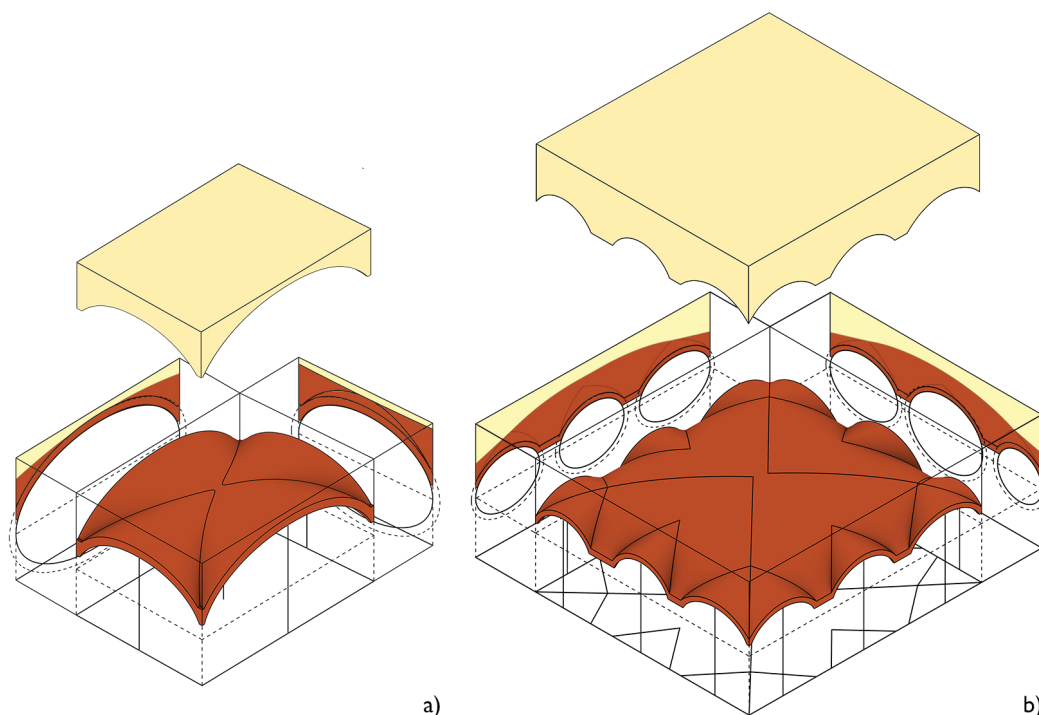


Fig. 5. Schema generazione delle volte a crociera (elaborazione degli autori).

Rhinoceros 7 con il supporto del *plug-in* Volvox, adottato per l'importazione e la gestione delle nuvole di punti in formato .E57. La scelta della modellazione NURBS, rispetto all'uso di *mesh* poligonali ottenute direttamente dalle nuvole di punti del rilievo [Quattrini et al. 2019, pp. 957-964], è dovuta soprattutto a esigenze tecniche legate al *software* FEM utilizzato, ma anche dalla volontà di produrre un risultato dalle applicazioni più generali (fig. 4).

Differentemente dall'approccio usato in lavori come [Angeliu Cardani, Coronelli 2019, pp. 1-17], vista la maggiore semplicità delle crociere del Castello e l'assenza di costoloni, si è scelto di non modellare le unghie individualmente, ma come intersezione di due solidi riconducibili a cilindri (fig. 5).

In *Grasshopper* (fig. 6), le generatrici ellittiche della superficie di intradosso sono state definite usando come asse maggiore i lati e gli assi delle stanze da coprire e come lunghezza del semiasse minore le frecce misurate dalla nuvola dei punti nella fase di *preprocessing*. Le generatrici d'estradosso sono ottenute tramite *offset* delle precedenti.

Le forme 3D di base sono generate dall'interpolazione (*lofting*) delle generatrici per ottenere le superfici voltate, e dall'estruzione del perimetro dei vani, traslato alla quota di

Fig. 6. Definizione della volta a crociera in Grasshopper. (elaborazione degli autori).

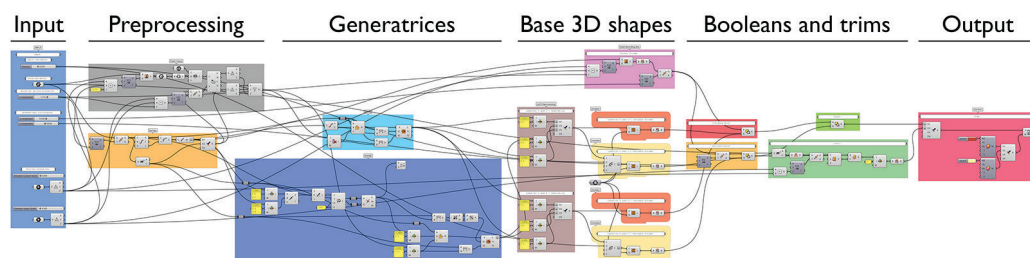


Fig. 7. Schema generazione della volta a padiglione (elaborazione degli autori).

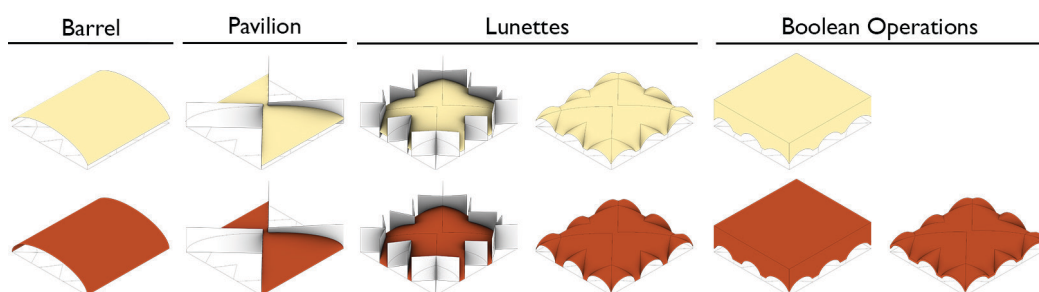
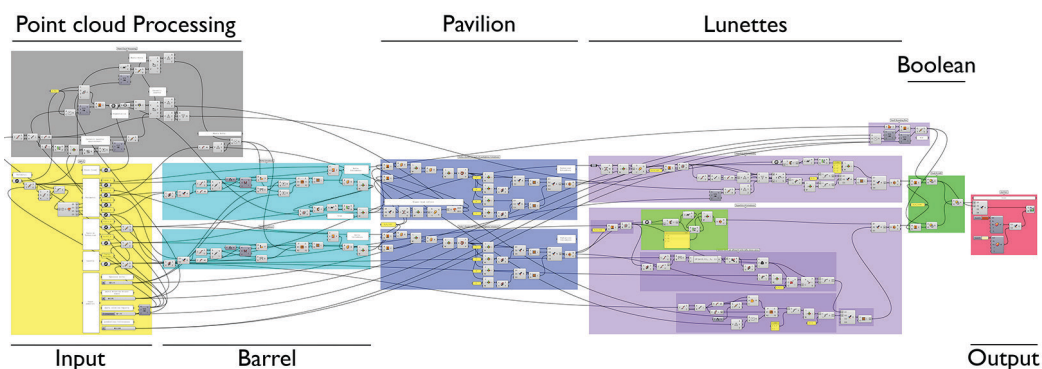


Fig. 8. Definizione della volta a padiglione in Grasshopper (elaborazione degli autori).



imposta della volta, per definire il volume di ingombro della stessa. Tali geometrie di base sono state combinate tramite sottrazione booleana per ottenere due solidi preliminari che, intersecati, hanno definito la geometria della porzione strutturale della volta. Infine, il volume preliminare con la superficie di estradosso è stato tagliato per allinearsi alla quota del livello successivo, così come i peducci delle volte. L'implementazione delle volte lunettate ha presentato maggiori difficoltà ed ha richiesto una maggior semplificazione nell'idealizzazione della geometria e maggior interazione dell'operatore in quanto agli *input* richiesti, si sono aggiunte le proiezioni in pianta delle teste di padiglione e delle lunette (fig. 7).

L'implementazione VPL (fig. 8) si è basata sulla metodologia già descritta per le volte a crociera, discostandosi unicamente riguardo la generazione delle superfici di intradosso ed estradosso. Come descritto in [Spallone 2019, pp. 91-102] e già applicato in [Quattrini et al. 2023, pp. 1271-1278], l'intradosso del padiglione è ottenuto tagliando la botte con semipiani verticali passanti per le proiezioni in pianta delle teste e raccordando le tracce ottenute da tale sezione. Le lunette sono ottenute in modo analogo, raccordando le generatrici (gli archi ellittici laterali definiti sulla base delle proiezioni in pianta e le quote ottenute dalla nuvola) alle tracce sulle superfici di taglio, in questo modo ottenendo unghie rampanti a pianta triangolare. La stessa operazione è stata ripetuta applicando un *offset* alle generatrici per generare le superfici di estradosso. Come per la volta a crociera sono stati ottenuti gli ingombri delle volte e combinati con le superfici voltate, generando i solidi preliminari che, intersecati e tagliati, hanno portato al risultato finale.

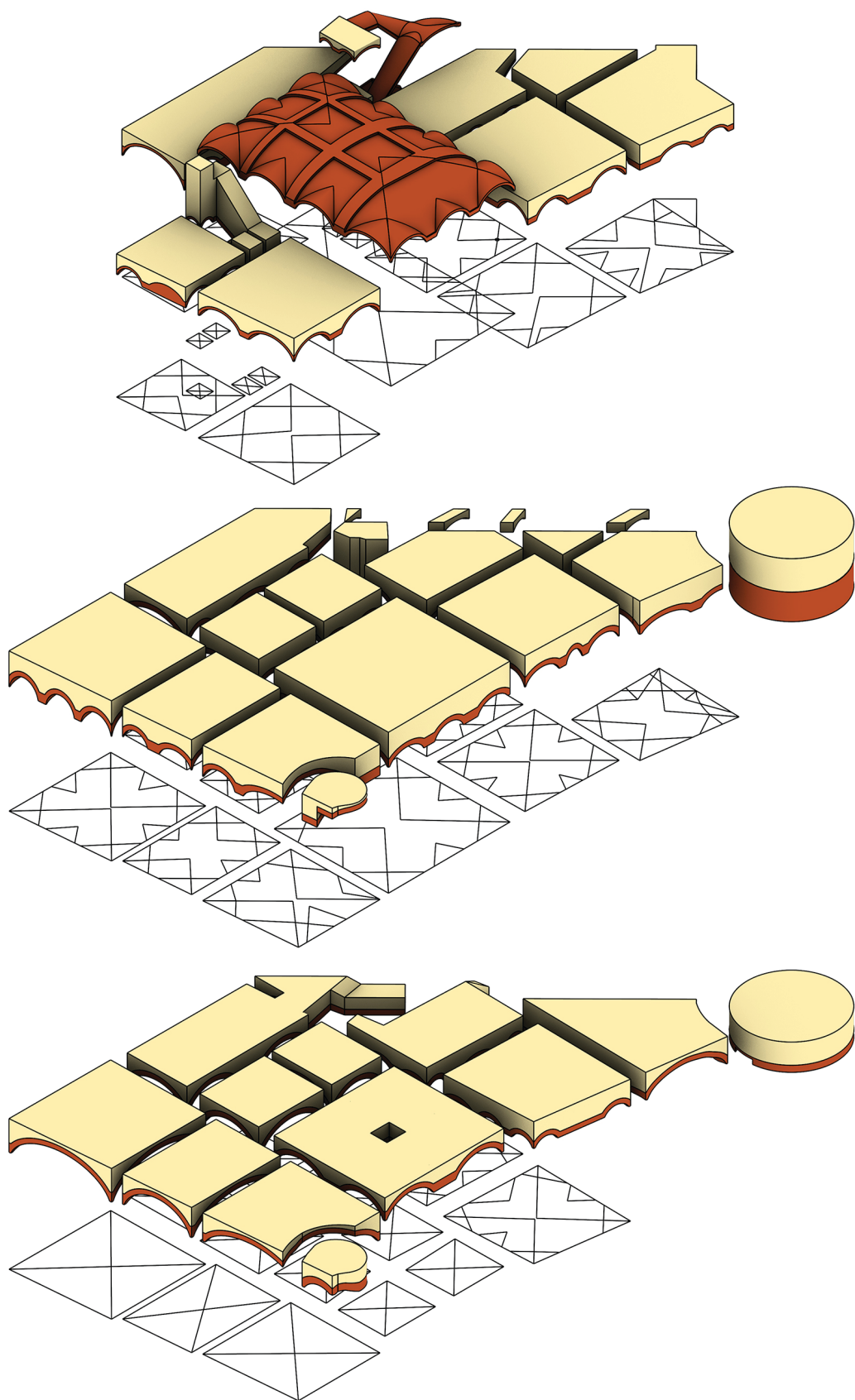
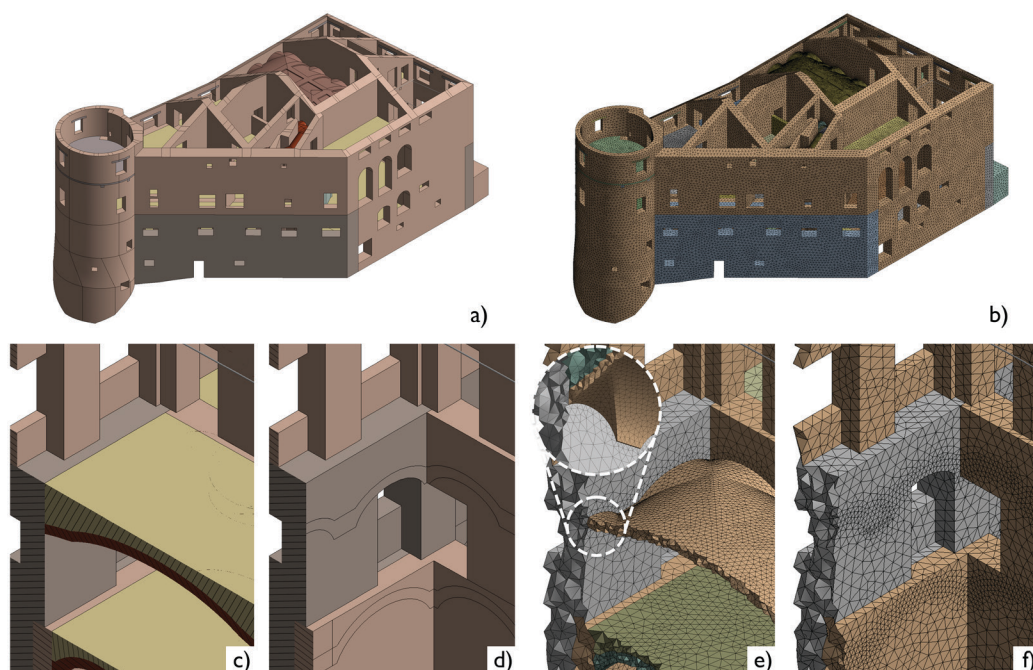


Fig. 9. Vista prospettica dei modelli delle volte e delle proiezioni usate per la generazione (elaborazione degli autori).

Fig. 10. Modello FEM in ANSYS Mechanical. a. Modello geometrico; b. mesh FEM; c. sezione del modello geometrico; d. tracce delle volte sulle murature; e. continuità della mesh FEM tra i diversi elementi geometrici e dettaglio su un peduccio; f. continuità della mesh permessa dalla transizione tra are con diversa dimensione degli elementi (elaborazione degli autori).



Il modello 3D del Castello

La modellazione 3D del Castello è iniziata dalle strutture verticali e dalla necessaria definizione delle quote di riferimento dei diversi livelli della fabbrica. La semplificazione delle piante è stata eseguita manualmente compatibilmente con il livello di dettaglio richiesto. Anche le proiezioni delle volte lunettate sono state disegnate manualmente basandosi sulla nuvola di punti, così come manualmente sono state misurate le quote del piano di imposta. Le volte, inclusi i riempimenti, sono state generate nella loro posizione finale tramite gli algoritmi VPL descritti, completando così il modello geometrico del Castello (fig. 9). Il software FEM utilizzato (ANSYS Mechanical Workbench) garantisce nativamente l'interoperabilità con Rhinoceros, consentendo l'importazione diretta del modello in formato .3dm. L'accuratezza nella modellazione ha permesso l'individuazione automatica delle superfici di contatto tra i diversi solidi e la creazione un'unica mesh continua, evitando il ricorso alla definizione di interfacce che avrebbero complicato il modello FEM da un punto di vista meccanico e computazionale (fig. 10).

Tipologia	Numero	Superfici (volte + riempimenti)	Superfici Totali
Crociere	20	12 + 9	420
Volte lunettate	16		
8 lunette	7	26 + 16	294
10 lunette	4	30 + 18	192
12 lunette	4	34 + 20	216
14 lunette	1	38 + 0	38
Botti lunettate	2	18+12	60
Botte	5	6+6	60
Volte totali	59	Numero superfici NURBS totali	1280

Tab. I. Prospetto riassuntivo delle volte generate e del totale delle superfici NURBS che le compongono.

Conclusioni

La metodologia presentata ha permesso la realizzazione di un modello geometrico tridimensionale di tutto il Castello, la cui creazione sarebbe stata impraticabile nei tempi disponibili senza l'automatizzazione del processo di modellazione. L'approccio VPL si è dimostrato più efficiente e veloce degli approcci manuali nella modellazione delle volte a crociera e lunettate, anche tenendo in considerazione l'iniziale investimento di tempo per l'implementazione degli algoritmi. Inoltre, ha permesso di ridurre le operazioni manuali al solo rilievo bidimensionale, riducendone notevolmente i tempi, la complessità e le competenze pratiche di modellazione necessarie all'operatore. Ciò ha anche ridotto possibili difetti ed errori che, altrimenti, avrebbero potuto compromettere le fasi successive della modellazione FEM. Infine, tale approccio, ha di fatto consentito la creazione di un modello meccanico tridimensionale di una complessità che raramente viene raggiunta, oltre che per i costi computazionali, soprattutto per le difficoltà di modellazione.

Delle cinquantanove volte del Castello, venti crociere e sedici volte lunettate sono state generate tramite gli algoritmi presentati, mentre due botti lunettate e cinque botti sono state generate con una versione semplificata dell'algoritmo sviluppato per le volte lunettate (tab. 1). La copertura del salone principale ha richiesto un passaggio ulteriore di modellazione manuale per l'aggiunta di costoloni estradossali, ma le geometrie di base sono state, anche in questo caso, ottenute tramite piccole modifiche dello *script* VPL, velocizzando notevolmente il processo. Solo le tre cupole delle torri, due volte irregolari, e le botti rampanti delle scale, che non sono state contate nel computo totale delle volte, hanno richiesto una modellazione manuale, ritenuta, solo in questo caso, più rapida rispetto allo sviluppo di algoritmi specifici.

In prospettiva futura, gli stessi algoritmi potrebbero essere ulteriormente raffinati per migliorare l'accuratezza dimensionale, ad esempio aumentando il numero di punti di controllo delle generatrici campionati sulla nuvola di punti, o il numero di generatrici stesse. Inoltre, tali algoritmi potrebbero essere implementati in ambito HBIM con scopi prettamente legati alla documentazione e alla gestione del patrimonio architettonico.

Ringraziamenti

Ringraziamo la dr. Chiara Ferrero per il contributo nella modellazione geometrica delle strutture verticali e alla modellazione FEM, e le prof.sse Chiara Calderini e Anna Boato che hanno diretto la campagna di ricerca sul Castello riguardo, rispettivamente, gli aspetti strutturali e storici.

Riferimenti bibliografici

Aliberti, L., de-Miguel-Sánchez, M., González-Uriel, A. (2024). The singular brick vault by slices in Tower J17 from the Aurelian Walls in Rome. In *Nexus Network Journal*, pp. 593-608. <https://doi.org/10.1007/s00004-024-00770-3>.

Angjeliu, G., Cardani, G., Coronelli, D. (2019). A parametric model for ribbed masonry vaults. In *Automation in Construction*, 105, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.006>.

Argiolas, R., Cazzani, A., Reccia, E., Bagnolo, V. (2019). From LIDAR data towards HBIM for structural evaluation. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 125-132. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-125-2019>.

Bagnolo, V., Argiolas, R., Vanini, C. (2022). Algorithmic modelling as a key tool for ribbed vault. In *Nexus Network Journal*, 24, pp. 147-166. <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00570-z>.

Banfi, F. (2019). HBIM generation: Extending geometric primitives and BIM modelling tools for heritage structures and complex vaulted systems. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 139-146. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-139-2019>.

Barazzetti, L. (2016). Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds. In *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), pp. 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.005>.

Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. In *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57, pp. 71-87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>.

Boato, A., Calderini, C., Ferrero, C. (2023). Archeologia dell'architettura e diagnosi del dissesto per una conoscenza integrata: il caso del Castello Doria-Malaspina di Calice al Cornoviglio (SP). In A. Boato (a cura di). *Restauro dell'architettura*. Per un progetto di qualità, sezione 3, pp. 530-538.

Bolognesi, C., Stancato, G. (2021). Renaissance vaults: Geometry, NURBS and computational opportunities for reconstruction. *DisegnareCon*, 14(26), pp. 1-11. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.26.2021.5>.

Buldo, M., Agustín-Hernández, L., Verdoscia, C., Tavalare, R. (2023). A scan-to-BIM workflow proposal for cultural heritage: Automatic point cloud segmentation and parametric-adaptive modelling of vaulted systems. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 333-340. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-333-2023>.

Capone, M., Lanzara, E. (2019). Scan-to-BIM vs 3D ideal models HBIM: Parametric tools to study domes geometry. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, pp. 219-226. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-219-2019>.

Capone, M., Lanzara, E. (2021). Parametric library for vaults indexing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1-2021, pp. 107-114. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-107-2021>.

Ferrero, C., Sacco, G., Calderini, C. (2025). Multi-hazard structural damage assessment of historic masonry buildings: The case study of a medieval castle in northern Italy. In *5th International Conference on Protection of Historical Constructions*, Naples. DOI:10.1007/978-3-031-87316-4_50.

Gaetani, A., Monti, G., Lourenço, P.B., Marcari, G. (2015). Design and analysis of cross vaults along history. In *International Journal of Architectural Heritage*, 9(6), pp. 841-856. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1132020>.

Jobbik, E., Eszter, J. (2023). A cross-vault system's relative periodisation based on geometric analysis: The vaulting system of the apse of the Inner City Parish Church of Budapest. In *Építés - Építészettudomány*, 51(1-2), pp. 115-137. <https://doi.org/10.1556/096.2023.00091>.

Lanzara, E., Samper, A., Herrera, B. (2019). Point cloud segmentation and filtering to verify the geometric genesis of simple and composed vaults. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 645-652. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-645-2019>.

Natta, F. (2023). Algorithmic modeling for complex vaults in Vittone's civil architecture between archival drawings and realizations. In *Nexus Network Journal*, 25, pp. 381-387. <https://doi.org/10.1007/s00004-023-00677-5>.

Quattrini, R., Clementi, F., Lucidi, A., Giannetti, S., Santoni, A. (2019). From TLS to FE analysis: Point cloud exploitation for structural behaviour definition. The San Ciriaco's bell tower. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 957-964. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-957-2019>.

Quattrini, R., Sacco, G., De Angelis, G., Battini, C. (2023). Knowledge-based modelling for automatizing HBIM objects: The vaulted ceilings of Palazzo Ducale in Urbino. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1271-1278. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1271-2023>.

Spallone, R. (2019). Lunette vaults in Guarini's works: Digital models between Architettura Civile and Modo di misurare le fabbriche. In *Disegno*, 4, pp. 91-102. <https://doi.org/10.26375/disegno.4.2019.10>.

Ursini, A., Grazzini, A., Matrone, F., Zerbinatti, M. (2022). From scan-to-BIM to a structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation. In *Automation in Construction*, 141, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104518>.

Autori

Giulio Lucio Sergio Sacco, Università di Genova, giulioluciosergio.sacco@edu.unige.it
Carlo Battini, Università di Genova, carlo.battini@unige.it

Per citare questo capitolo: Giulio Lucio Sergio Sacco, Carlo Battini. (2025). Modellazione algoritmica per il processo Scan-to-FEM di un sistema voltato complesso. In L. Carlevaris et al. (a cura di). *ékphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/ékphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 3303-3322. DOI: 10.3280/oa-1430-c926.

Algorithmic Modelling for Scan-to-FEM Process of a Complex Vaulted System

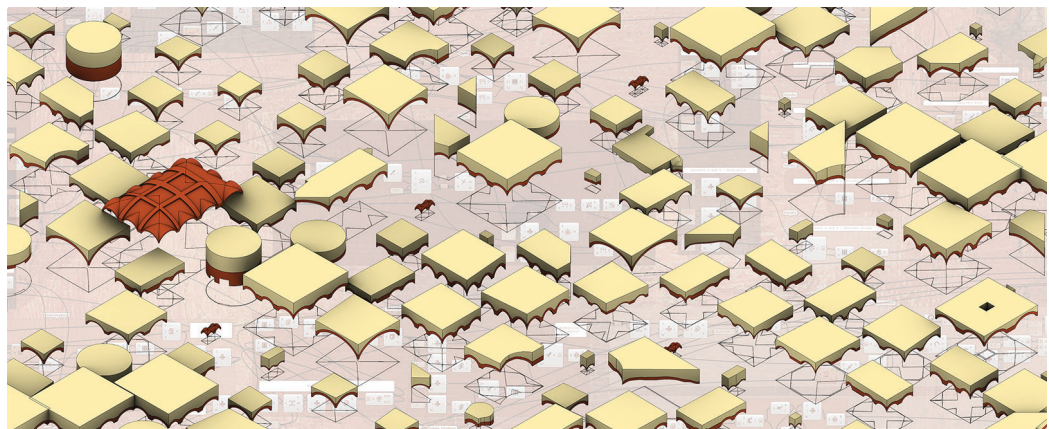
Giulio Lucio Sergio Sacco
Carlo Battini

Abstract

This paper presents the application of a semi-automatic approach for managing the FEM process of the vaulted system of the Doria Malaspina Castle in Calice al Cornoviglio, focusing on the modelling of ribbed vaults and lunette pavilion headed barrel vaults. The modelling methodology presented is based on point cloud surveying and uses parametric modelling through a VPL (Visual Programming Language) approach, which, with a reduced number of inputs, generates solid models that include both the actual structure of the vaults and their infill. The main geometric parameters, particularly the rise of each generator, are automatically derived from point cloud processing, significantly reducing the need for manual intervention in the modelling process. The application of this approach to the case study demonstrated how a semi-automatic method can greatly reduce modelling time and mitigate potential modelling errors, enabling the implementation of FEM models for complex geometries within a reasonable timeframe, even considering the initial time investment for VPL implementation. The generated models, in addition to structural analysis, can also be used for documentation and architectural heritage management in an HBIM environment.

Keywords

Parametric modelling, Scan-to-FEM, point clouds, masonry vaults, VPL.



Automatically generated vaults through the use of VPL algorithms (elaboration by the authors).

Introduction

With the introduction of modern digital surveying techniques, the demand for an accurate representation of the state of architectural heritage has increased, especially in the field of the conservation of historic buildings. This is true both in the fields of historical-interpretive analysis [Jobbik, Eszter 2023, pp. 115-137] and architectural representation [Capone, Lanzara 2021, pp. 107-114; Bagnolo, Argiolas, Vanini 2022, pp. 147-166; Natta 2023, pp. 381-387; Aliberti, de-Miguel-Sánchez, González-Uriel 2024, pp. 593-608] and in the fields of restoration, conservation, and structural analysis [Barazzetti *et al.* 2015, pp. 71-87; Angeliu Cardani, Coronelli 2019, pp. 1-17]. Point clouds obtained through laser scanners and structure-from-motion techniques, despite being an accurate and geometrically rich representation of the visible surfaces of surveyed objects, often require a critical interpretation of the data and its conversion into three-dimensional models that allow interoperability and effective use by the different professionals involved [Barazzetti 2016, pp. 298-311]. For applications such as BIM or structural analysis, synthetic and realistic representations capable of gathering a large quantity of information are often required. In the case of vaults, it may be necessary to describe their internal structure, their division into architectural-structural elements and so on, also based on data collected from in situ investigations. These needs, combined with the high costs of manual modelling, have led to a growing interest in the parametric representation of architecture, capable of describing architectural elements based on a limited number of fundamental parameters and generative algorithms. Masonry vaults are one of the most important architectural and structural elements of European historical heritage, and probably the ones that have benefited most from the possibilities offered by these approaches applied to their study. Several examples of vault parametric modelling in a BIM environment can be found in the literature, either through VPL implementations [Capone, Lanzara 2021, pp. 107-114; Quattrini *et al.* 2019, pp. 957-964] adaptive families [Buldo *et al.* 2023, pp. 333-340], or add-in [Banfi 2019, pp. 139 - 146]. The same techniques have been used to develop scan-to-FEM approaches, both for the creation of surfaces [Argiolas *et al.* 2019, pp. 125-132] and solids [Angeliu, Cardani, Coronelli 2019, pp. 1-17]. The present work is part of an interdisciplinary research [Boato, Calderini, Ferrero 2023, pp. 530-538] aimed at the knowledge and conservation of the Doria Malaspina Castle in Calice al Cornoviglio (SP), hereinafter 'the Castle'. It is an imposing four-storey building with an irregular plan and two circular towers, which went through numerous construction phases between the 13th and 20th centuries (fig. 1). The horizontal partitions, except for two modern interventions needed following collapse, are made with masonry vaults with infill. Cross vaults and pavilion heads lunette vaults, hereinafter 'lunette vaults', are the most used in the Castle, followed by domes, lunette barrels, rampant barrels, and irregular ones (fig. 2). The research presented here starts from the need to create a three-dimensional global finite element model of the castle in order to conduct a structural and seismic analysis [Ferrero, Sacco, Calderini 2025, pp. 411-419]. Considering the practical impossibility of pursuing manual modelling, which would have been excessively time-consuming mainly because of the vaulted structures [Ursini *et al.* 2022, pp. 1-14], it was decided to explore a VPL approach for their modelling.

Methodology

The debate on the design geometry of cross vaults has always been lively, both regarding the possible geometries of the surfaces [Gaetani *et al.* 2015, pp. 841-856] and masonry patterns, as well as with regard to the building technique. This discussion emerges from the study of treatises [Capone, Lanzara 2019, pp. 219-226] and in the survey of historic buildings, where different geometries [Bagnolo, Argiolas, Vanini 2022, pp. 147-166] and masonry patterns can be found. These three aspects (shape, masonry patterns, and constructive techniques) are linked by an interdependent relationship, and the choice of one of the three has often implied the development or adoption of the other two. The same applies to lunette vaults, where, however, there is a greater variability of forms and



Fig. 1. Doria Malaspina Castle: a. northeast view; b. point-cloud (elaboration by the authors).

building techniques, in part because of the greater geometric complexity that allows for more variations. In addition to these theoretical and design problems, there are inevitable discrepancies between design and construction, which are particularly evident in less important buildings, as well as geometric variations due to subsequent interventions and damage accumulated over time, which contribute to the discrepancy, sometimes significant, between the work conceived and the building as has come down to us.

Therefore, the choice of the geometry to be used to represent complex architectural elements is neither simple nor unambiguous. In the context of geometric modelling aimed at structural analysis, particularly finite element modelling (FEM), it is necessary to consider whether to take into account the deformations accumulated by the building, possibly pointing back to the issue of identifying the design geometry and the level of detail to adopt (level of geometry or LOG, according to BIM terminology).

Finally, specific attention must be given to the specific requirements of the software used for numerical analysis, especially to ensure the generation of good quality FEM meshes and to guarantee geometrical consistency between adjacent structural elements. Here, the role of an accurate 3D representation of a building is crucial for limiting structural modelling and numerical problems.

For these reasons, and considering both the uncertainties associated with the topic and the necessity to develop a simple approach that minimises modelling time, the solution adopted was to generate the vaults in their current configuration, simplifying their shapes wherever possible. In particular, it was decided to avoid shape fitting approaches [Lanzara, Samper, Herrera 2019, pp. 645-652; Bolognesi, Stancato 2021, pp. 1-11] or accurate



Fig. 2. Selected examples of the types of vaults present in the castle (elaboration by the authors).

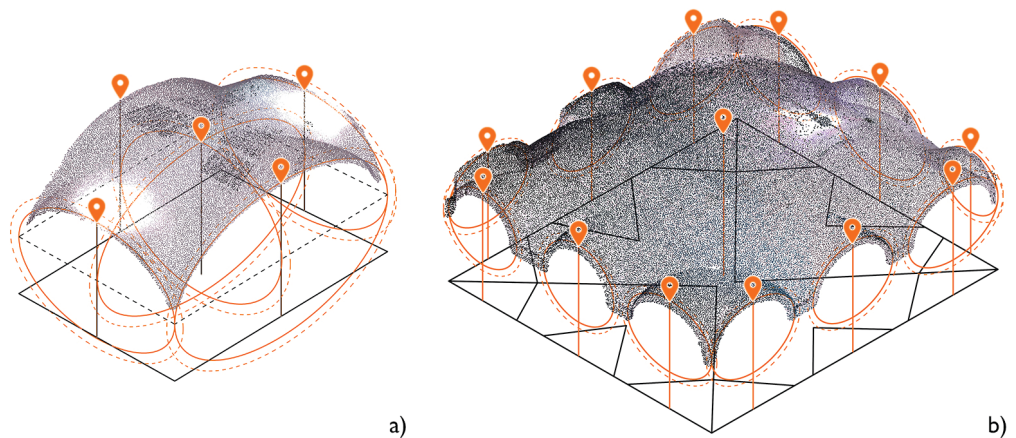


Fig. 3. Sampling of the point cloud for the definition of the generatrices: a. cross vault; b. lunette vault (elaboration by the authors).

modelling by sections [Aliberti, de-Miguel-Sánchez, González-Uriel 2024, pp. 593-608], favouring the adoption of a simplified model based on a limited number of geometric parameters obtained by sampling points on specific locations within the cloud (fig. 3). For structural modelling purposes, the actual masonry vault structure, which is of moderate thickness, was distinguished from the infill, which has no structural function. Only the intrados surfaces of the vaults were modelled on the basis of the point cloud, while the extrados surfaces, for which explicit modelling was necessary in any case, were derived from the generatrix curves of the intrados and the structural thickness measured in situ through endoscopies. The infill was modelled based on the surface of the extrados of the vault, filling the remaining volume up to the floor level of the upper stories. The pendentives of the vaults were cut to avoid meshing problems owing to the presence of very accentuated edges, which would have created elongated finite elements in the final model. The parametric modelling algorithms were implemented in *Grasshopper* for *Rhinoceros 7* with the support of the *Volvox plug-in*, adopted for the import and management of point clouds in .E57 format. The choice of NURBS modelling, as opposed to the use of polygonal

Fig. 4. Output of VPL algorithms, NURBS geometric models of vaults and infills: a. cross vault; b. lunette vault (elaboration by the authors).

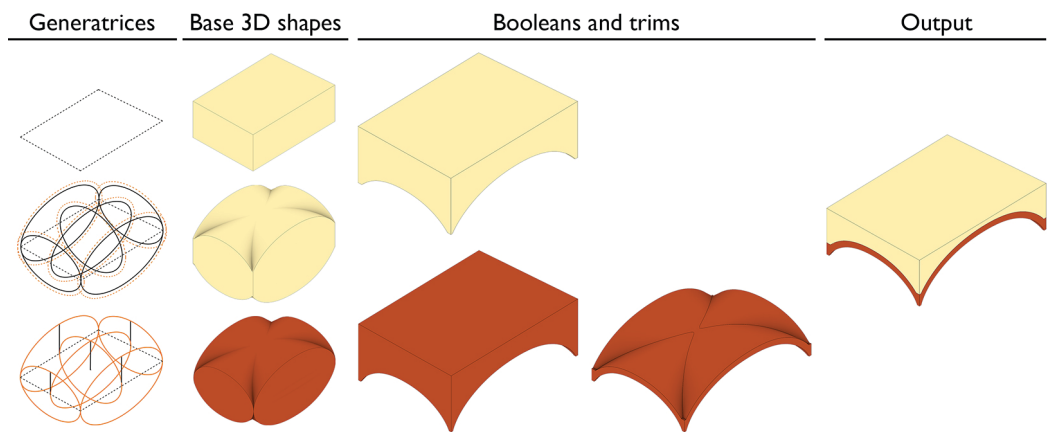
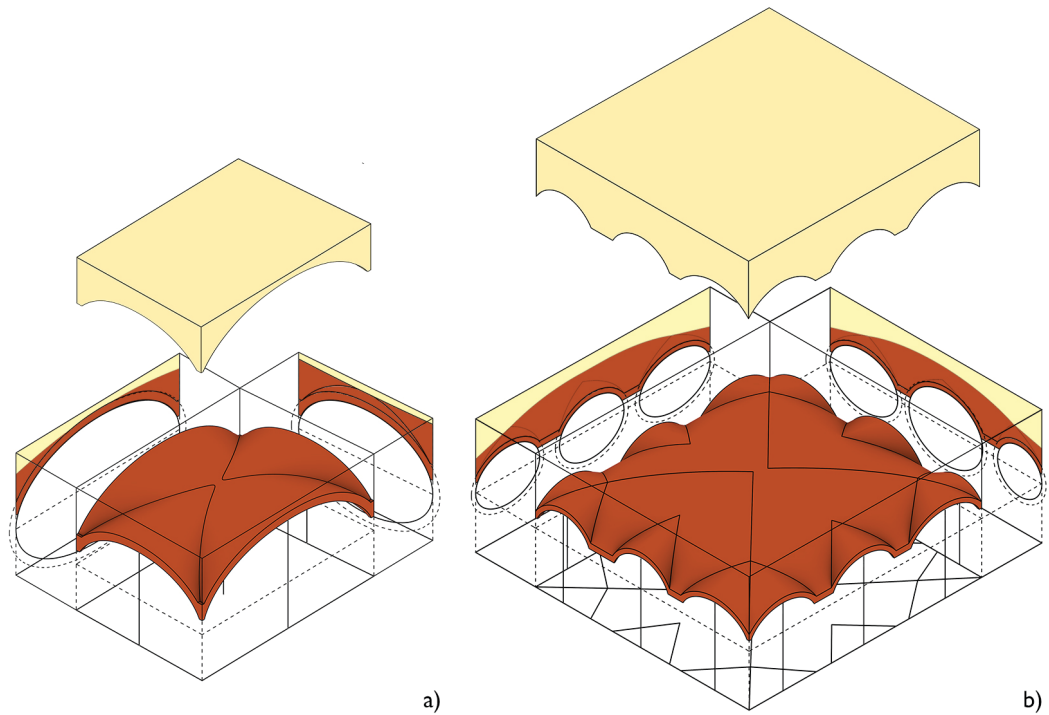


Fig. 5. Scheme for the generation of cross vaults (elaboration by the authors).

meshes obtained directly from the point clouds of the survey [Quattrini *et al.* 2019, pp. 957-964], is motivated by the technical requirements of the FEM software employed as well as by the desire to produce results with more general applications (e.g. HBIM) (fig. 4).

Differently from the approach used in previous studies [Angeliu, Cardani, Coronelli 2019, pp. 1-17] and given the greater simplicity of the cross vault of the Castle and the absence of ribs, it was chosen to avoid the individual modelling of the different surfaces of the intrados, and to approach the modelling through the intersection of two solids that can be reconducted to cylinders (fig. 5).

In *Grasshopper* (fig. 6), the elliptical generatrices of the intrados surface were defined using the sides and axes of the room perimeters as the major axes of each ellipse, and the lengths of the minor semi-axes were determined by the rise measured from the point cloud during the pre-processing phase. The extrados generatrices were obtained by offsetting the intrados ones. The basic 3D shapes were generated by interpolating (lofting) the generatrices to create the vaulted surfaces and by extruding the perimeter of the rooms, translated up to the spring level of the vault, to encompass the gross volume

Fig. 6. Cross vault definition in *Grasshopper* (elaboration by the authors).

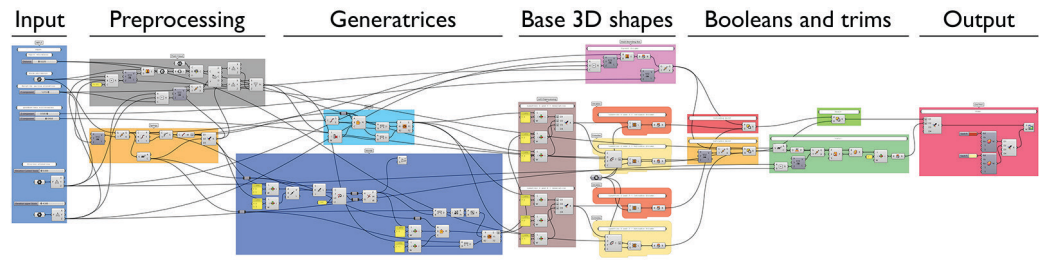


Fig. 7. Scheme for the generation of lunette vaults (elaboration by the authors).

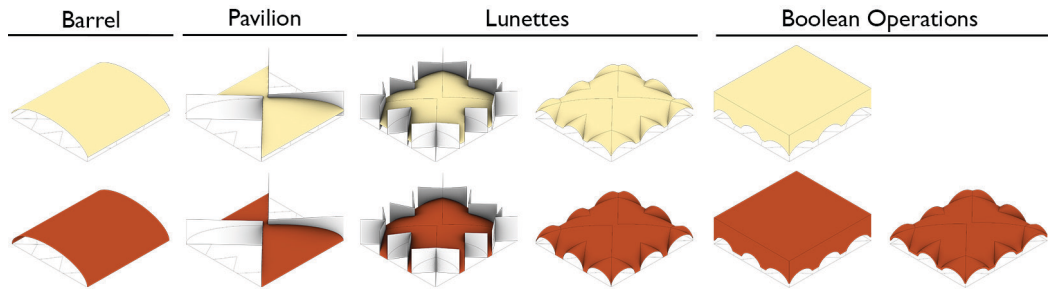
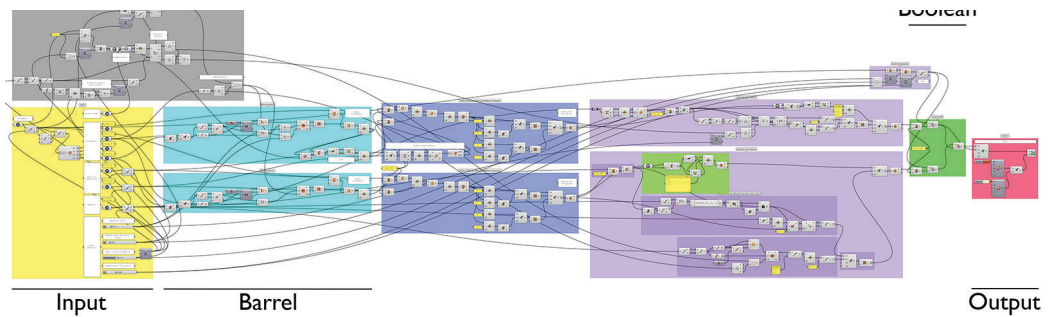


Fig. 8. Lunette vaults definition in *Grasshopper* (elaboration by the authors).



of the structure. These basic geometries were combined using Boolean subtraction to obtain two preliminary solids whose intersection defined the geometry of the structural portion of the vault. Finally, the preliminary volume carved with the extrados surface (sand-coloured one) was trimmed to align with the level of the next storey. Similarly, the pendentives of the structural portion of the vaults were trimmed.

The implementation of the lunette vaults presented more challenges; it required a greater simplification in the idealised shape of the geometry and more interaction from the operator, as the floor plan projections of the pavilion heads and lunettes were added to the required inputs (fig. 7).

The VPL implementation (fig. 8) was based on the methodology already described for cross vaults, deviating only regarding the generation of the intrados and extrados surfaces. As described in [Spallone 2019, pp. 91-102] and already applied in [Quattrini *et al.* 2023, pp. 1271-1278], the intrados of the pavilion are obtained by cutting the barrel with vertical half-planes passing through the plan projections of the heads and lofting the traces obtained from that sectioning. The lunettes were obtained in a similar way by connecting the generatrixes (the lateral elliptical arches defined on the basis of the plan projections and the elevations obtained from the point cloud) to the traces on the cutting surfaces, in this way obtaining triangular plan rampant lunettes. The same operation was repeated, after the application of an offset to the generatrixes of the intrados, to generate the extrados surfaces. As in the case of the cross vault, the ceiling gross volume was obtained from the plan perimeters and combined with the vaulted surfaces, generating the preliminary solids that, intersected and trimmed, led to the final result.

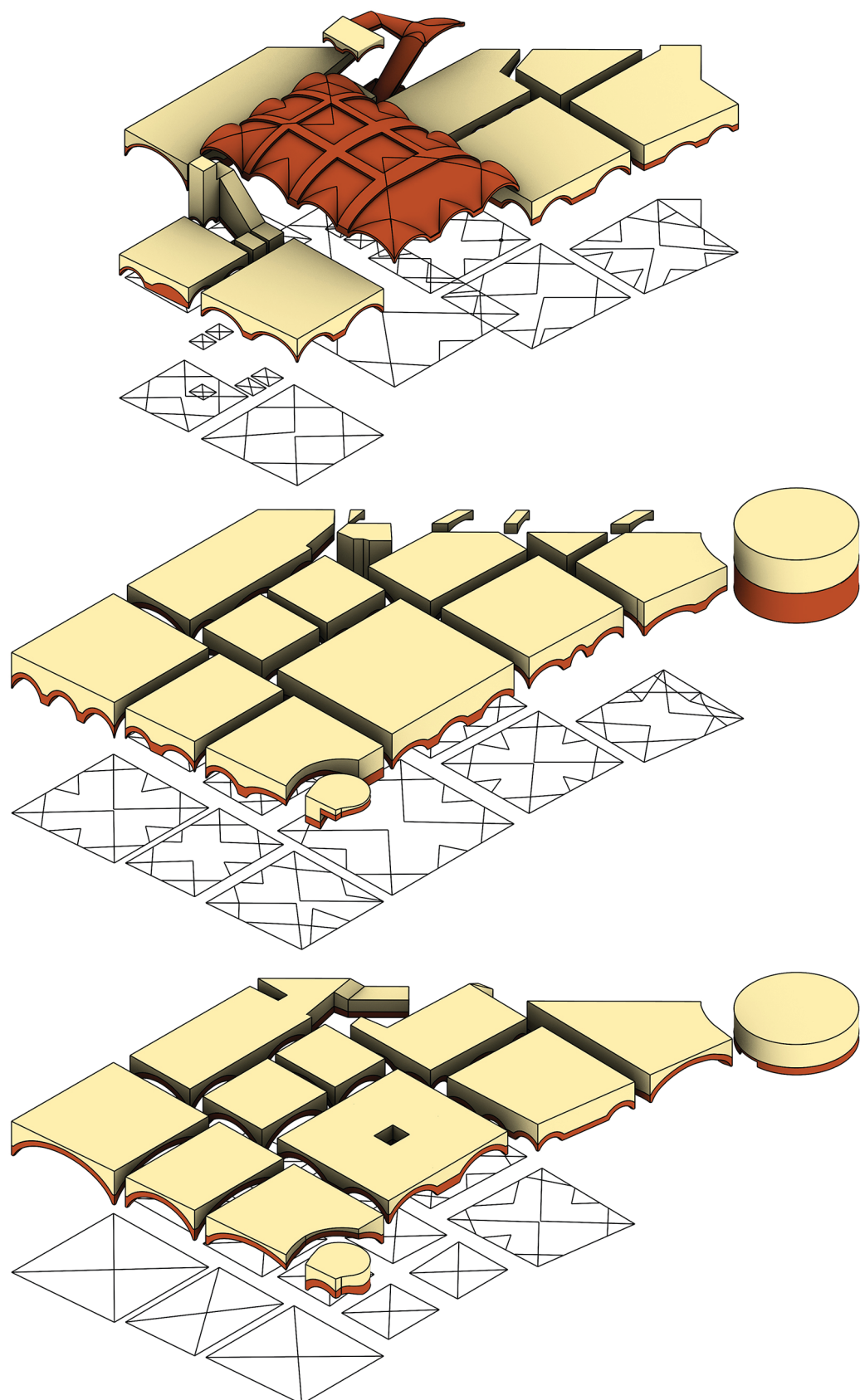


Fig. 9. Axonometric view of the vault models and projections used as inputs for the generation (elaboration by the authors).

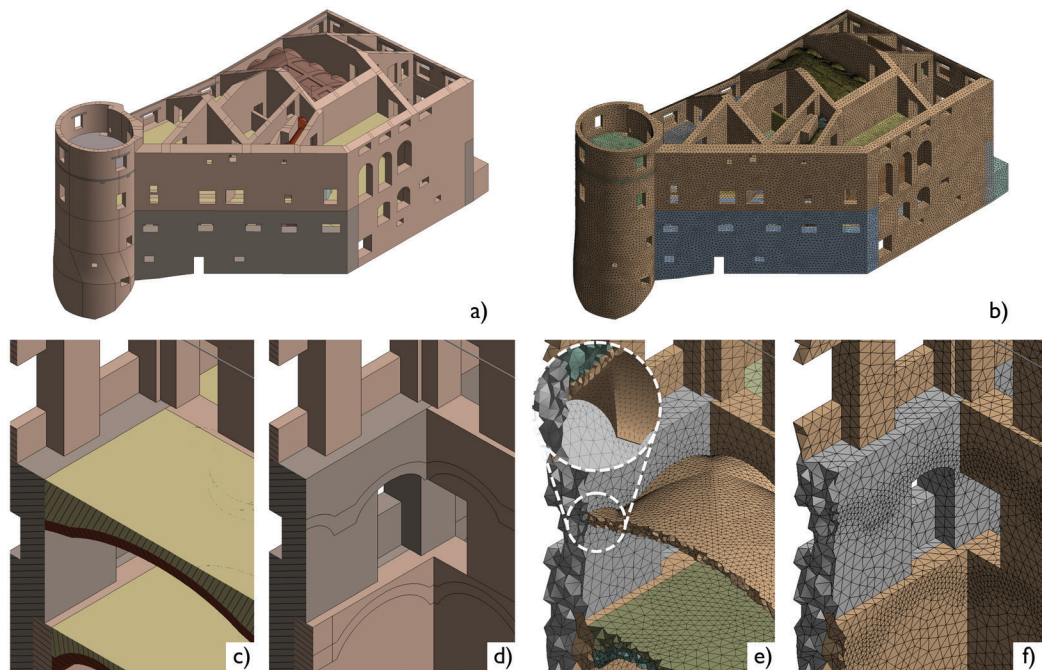


Fig. 10. FE model in *ANSYS Mechanical*. a. Geometrical model; b. FE mesh; c. section of the geometrical model; d. details of the traces of the vaults on the masonry; e. continuity of the FEM mesh between the different geometrical elements and details on a pendentive; f. the continuity of the mesh allowed for a smooth transition between areas with different element sizes (elaboration by the authors).

The 3D model of the Castle

The 3D modelling of the Castle began with the vertical structures and the necessary definition of the reference elevations of the different storeys of the building. The simplification of the plans was carried out manually consistently with the required level of detail. The projections of the lunette vaults were also manually drawn based on the point cloud, just as the elevations of the spring plane were manually measured.

The vaults, including the fills, were generated in their final position using the described VPL algorithms, thus completing the geometric model of the Castle (fig. 9). The FEM software employed (*ANSYS Mechanical Workbench*) natively ensures interoperability with *Rhinoceros*, allowing the direct import of the model in .3dm format. The accuracy of the modelling allowed for the automatic identification of the contact surfaces between the different solids and the creation of a single continuous mesh, avoiding the need to define interfaces that would have complicated the FE model from a mechanical and computational point of view (fig. 10).

Typology	Number	Surfaces (vault + infill)	Total surfaces
Cross vaults	20	12 + 9	420
Lunette vaults	16		
8 lunettes	7	26 + 16	294
10 lunettes	4	30 + 18	192
12 lunettes	4	34 + 20	216
14 lunettes	1	38 + 0	38
Lunette barrels	2	18+12	60
Barrel	5	6+6	60
Total of vaults	59	Total of NURBS surfaces	1280

Tab. 1. Overview of the vaults generated via VPL and the total number of single NURBS surfaces constituting them.

Conclusions

The proposed methodology enabled the creation of a three-dimensional geometric model of the entire Castle, the creation of which would have been impractical in the time available without automating the modelling process.

The VPL approach proved to be more efficient, reliable, and faster than manual approaches in modelling the cross and lunette vaults, even when considering the initial investment of time needed to implement the algorithms. Furthermore, it allows the reduction of manual operations to two-dimensional surveying only, greatly reducing the time, complexity, and practical modelling skills required by the operator. This also reduced the possible defects and errors that, otherwise, might have compromised the subsequent stages of FEM modelling. Finally, this approach has in fact enabled the creation of a three-dimensional mechanical model of a complexity that is rarely achieved, primarily because of modelling difficulties, but also due to computational costs.

Among the fifty-nine Castle vaults, twenty cross vaults and sixteen lunette vaults were generated through the algorithms presented, while two lunette barrels and five barrels were generated using simplified versions of the algorithm developed for the lunette vaults (tab. I). Among the fifty-nine castle vaults, twenty cross vaults and sixteen lunette vaults were generated through the algorithms presented, while two lunette barrels and five barrels were generated using simplified versions of the algorithm developed for the lunette vaults (tab. I). The vault of the main hall required an additional step of manual modelling for the addition of extrados ribs, but the basic geometries were, again, obtained through minor modifications of the VPL script, greatly accelerating the process. Only the three domes of the towers, two irregular vaults, and the rampant barrels of the stair, which are not counted here in the total vault count, required manual modelling, which was considered, only in this case, faster than developing specific algorithms.

From a future perspective, the same algorithms could be further refined to improve dimensional accuracy, such as by increasing the number of control points of the generatrices sampled on the point cloud, or the number of generatrices themselves. In addition, such algorithms can be implemented in HBIM for documentation purposes and management of architectural heritage.

Acknowledgements

We would like to thank dr. Chiara Ferrero for her contribution in the geometrical modelling of vertical structures and FE-Modelling, and professors Chiara Calderini and Anna Boato who directed the research campaign on the Castle regarding structural and historical aspects respectively.

Reference List

- Aliberti, L., de-Miguel-Sánchez, M., González-Uriel, A. (2024). The singular brick vault by slices in Tower J17 from the Aurelian Walls in Rome. In *Nexus Network Journal*, pp. 593-608. <https://doi.org/10.1007/s00004-024-00770-3>.
- Angeliu, G., Cardani, G., Coronelli, D. (2019). A parametric model for ribbed masonry vaults. In *Automation in Construction*, 105, pp. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.006>.
- Argiolas, R., Cazzani, A., Reccia, E., Bagnolo, V. (2019). From LIDAR data towards HBIM for structural evaluation. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 125-132. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-125-2019>.
- Bagnolo, V., Argiolas, R., Vanini, C. (2022). Algorithmic modelling as a key tool for ribbed vault. In *Nexus Network Journal*, 24, pp. 147-166. <https://doi.org/10.1007/s00004-021-00570-z>.
- Banfi, F. (2019). HBIM generation: Extending geometric primitives and BIM modelling tools for heritage structures and complex vaulted systems. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 139-146. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-139-2019>.
- Barazzetti, L. (2016). Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds. In *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), pp. 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.005>.
- Barazzetti, L., Banfi, F., Brumana, R., Gusmeroli, G., Previtali, M., Schiantarelli, G. (2015). Cloud-to-BIM-to-FEM: Structural simulation with accurate historic BIM from laser scans. In *Simulation Modelling Practice and Theory*, 57, pp. 71-87. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.06.004>.
- Boato, A., Calderini, C., Ferrero, C. (2023). Archeologia dell'architettura e diagnosi del dissesto per una conoscenza integrata: il caso del Castello Doria-Malaspina di Calice al Cornoviglio (SP). In A. Boato (a cura di). *Restauro dell'architettura*. Per un progetto di qualità, sezione 3, pp. 530-538.

- Bolognesi, C., Stancato, G. (2021). Renaissance vaults: Geometry, NURBS and computational opportunities for reconstruction. *DisegnareCon*, 14(26), pp. 1-11. <https://doi.org/10.20365/disegnarecon.26.2021.5>.
- Buldo, M., Agustín-Hernández, L., Verdoscia, C., Tapolare, R. (2023). A scan-to-BIM workflow proposal for cultural heritage: Automatic point cloud segmentation and parametric-adaptive modelling of vaulted systems. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 333-340. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-333-2023>.
- Capone, M., Lanzara, E. (2019). Scan-to-BIM vs 3D ideal models HBIM: Parametric tools to study domes geometry. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W9, pp. 219-226. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-219-2019>.
- Capone, M., Lanzara, E. (2021). Parametric library for vaults indexing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1-2021, pp. 107-114. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-107-2021>.
- Ferrero, C., Sacco, G., Calderini, C. (2025). Multi-hazard structural damage assessment of historic masonry buildings: The case study of a medieval castle in northern Italy. In *5th International Conference on Protection of Historical Constructions*, Naples. DOI: 10.1007/978-3-031-87316-4_50.
- Gaetani, A., Monti, G., Lourenço, P.B., Marcari, G. (2015). Design and analysis of cross vaults along history. In *International Journal of Architectural Heritage*, 9(6), pp. 841-856. <https://doi.org/10.1080/15583058.2015.1132020>.
- Jobbik, E., Eszter, J. (2023). A cross-vault system's relative periodisation based on geometric analysis: The vaulting system of the apse of the Inner City Parish Church of Budapest. In *Építés - Építészettudomány*, 51(1-2), pp. 115-137. <https://doi.org/10.1556/096.2023.00091>.
- Lanzara, E., Samper, A., Herrera, B. (2019). Point cloud segmentation and filtering to verify the geometric genesis of simple and composed vaults. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 645-652. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-645-2019>.
- Natta, F. (2023). Algorithmic modeling for complex vaults in Vittone's civil architecture between archival drawings and realizations. In *Nexus Network Journal*, 25, pp. 381-387. <https://doi.org/10.1007/s00004-023-00677-5>.
- Quattrini, R., Clementi, F., Lucidi, A., Giannetti, S., Santoni, A. (2019). From TLS to FE analysis: Point cloud exploitation for structural behaviour definition. The San Ciriaco's bell tower. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15, pp. 957-964. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-957-2019>.
- Quattrini, R., Sacco, G., De Angelis, G., Battini, C. (2023). Knowledge-based modelling for automatizing HBIM objects: The vaulted ceilings of Palazzo Ducale in Urbino. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1271-1278. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1271-2023>.
- Spallone, R. (2019). Lunette vaults in Guarini's works: Digital models between Architettura Civile and Modo di misurare le fabbriche. In *Disegno*, 4, pp. 91-102. <https://doi.org/10.26375/disegno.4.2019.10>.
- Ursini, A., Grazzini, A., Matrone, F., Zerbinatti, M. (2022). From scan-to-BIM to a structural finite elements model of built heritage for dynamic simulation. In *Automation in Construction*, 141, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104518>.

Authors

Giulio Lucio Sergio Sacco, Università di Genova, giulioLuciosergio.sacco@edu.unige.it
Carlo Battini, Università di Genova, carlo.battini@unige.it

To cite this chapter: Giulio Lucio Sergio Sacco, Carlo Battini. (2025). Algorithmic Modelling for Scan-to-FEM Process of a Complex Vaulted System. In L. Carlevaris et al. (Eds.). *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 3303-3322. DOI: 10.3280/oa-1430-c926.