

Ipotesi di ricostruzione filologica delle volte della Parrocchiale di San Michele Arcangelo a Bressanone: proposta metodologica integrata all'uso delle NeRF

Alessandro Luigini
Francesca Condorelli
Barbara Tramelli
Giuseppe Nicastro
Michela Ceracchi

Abstract

Il contributo presenta uno studio dei sistemi voltati di due chiese del Sudtirolo, le chiese parrocchiali di Chiusa e Villandro, analizzandoli come modelli per un'ipotesi di ricostruzione filologica del sistema voltato della coeva Parrocchiale di San Michele Arcangelo di Bressanone. Lo studio propone una metodologia di ricerca innovativa e sperimentale che integra l'utilizzo di algoritmi basati su NeRF (Neural Radiance Fields) con la fotogrammetria per la creazione rapida di modelli 3D di elevata qualità, nel contesto più ampio della digitalizzazione e della valorizzazione del patrimonio culturale altoatesino.

Parole chiave
volte, tardo-gotico, Sudtirolo, NeRF, digital heritage.



Particolare del sistema voltato della chiesa di San Michele Arcangelo a Bressanone.

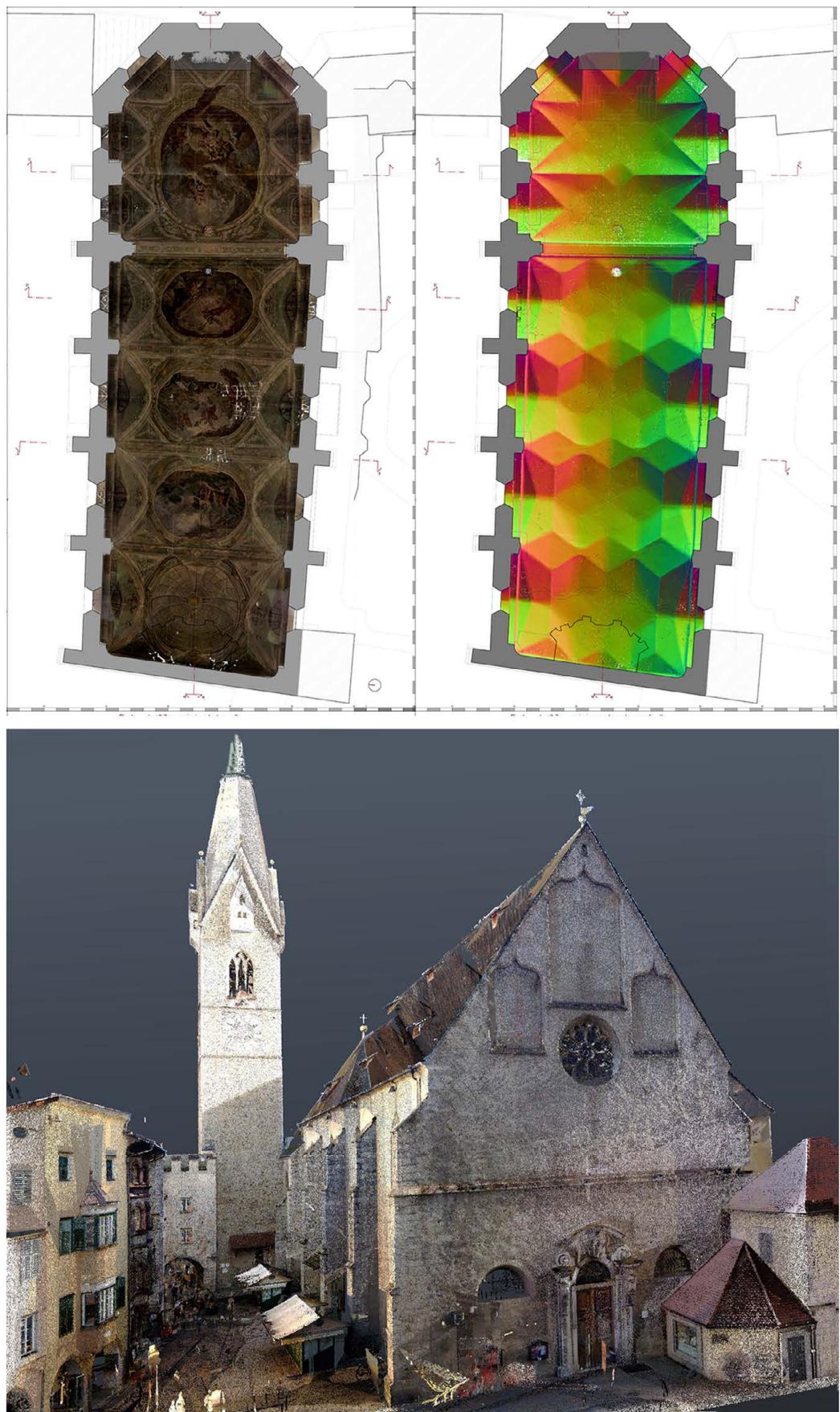


Fig. 1. La chiesa di San Michele Arcangelo a Bressanone: in alto, la pianta delle volte attuali e le giaciture tardo-gotiche individuate. In basso, una vista generale della point cloud. Elaborazioni degli autori.

Introduzione

Come già noto e riportato in un precedente stato di avanzamento del lavoro di ricerca [Lugini et al. 2023], la successione di eventi costruttivi, distruttivi e di adeguamento linguistico della fabbrica della Parrocchiale di San Michele, ha visto alla fine del XV secolo la realizzazione del sistema voltato esistente e nel periodo barocco la successiva rimozione delle costolonature a vantaggio della realizzazione della attuale decorazione ad affresco [1]. L'intero ciclo di affreschi determina una spazialità pittorica di tipo prettamente barocco, sovrapposta senza tentativi di integrazione, se si esclude la rimozione delle costolonature, alla residua struttura tardo-gotica.

Il rilievo tramite laser scanner e fotogrammetria sia terrestre che aerea hanno consentito l'identificazione delle giaciture delle porzioni residue delle volte stellate tardo-gotiche (fig. 1), ormai occultate alla vista dalla spazialità pittorica, e la ricostruzione della trama delle costolonature ha richiesto uno studio di carattere filologico, di cui qui si presentano la metodologia e i primi risultati.



Fig. 2. Villandro (BZ): la chiesa parrocchiale di Santo Stefano. Foto degli autori.

L'articolo si focalizza sul patrimonio architettonico sudtirolese prendendo in esame due casi studio, ovvero le parrocchie di Chiusa e di Villandro: utilizzando le nuove tecnologie digitali, il gruppo di ricerca ha realizzato modelli tridimensionali speditivi delle strutture di entrambe le chiese, in modo da favorire lo studio e la comprensione delle varie fasi di costruzione e rielaborazione delle rispettive architetture.

Questo work in progress si inserisce nel contesto più ampio dell'utilizzo delle tecnologie digitali per la conservazione, lo studio e la fruizione del patrimonio culturale, focalizzandosi su una

realità architettonica poco conosciuta e studiata nell'ambito della storia dell'arte e delle *digital humanities*.

Il presente articolo si suddivide in tre parti: una prima introduzione storico-artistica delle due chiese prese in esame, un'analisi dello stato dell'arte per quanto riguarda le ricostruzioni 3D con focus sulla metodologia utilizzata, e una discussione dei vantaggi di questo approccio di ricerca nonché delle prospettive di ricerca future [Luigini et al. 2023, pp. 165-174].



Fig. 3. Chiusa (BZ): la chiesa parrocchiale di Sant'Andrea. Foto degli autori.

Le chiese di Chiusa e Villandro tra il tardo-gotico e le nuove influenze stilistiche

Le chiese di Chiusa e Villandro sono un tipico esempio di architettura tardo-gotica tirolese, in cui gli artisti e gli architetti protagonisti hanno dato prova per entrambe le costruzioni di seguire le mutevoli influenze stilistiche provenienti dall'area germanica e specialmente dalla bassa Baviera, trasformando e riadattando questi impulsi all'inconfondibile stile tirolese, caratterizzato dalla semplicità delle forme esterne e dall'influenza stilistica di vari periodi.

Le chiese ci restituiscono un'immagine vivida di un luogo tipico e di un'arte che sono testimonianza del crocevia di influenze artistiche nella regione [2].

Il Tirolo ricevette il gotico come uno stile quasi pienamente sviluppato, perché finché era ancora in fase di sviluppo, l'arte romanica regnava sovrana nelle valli tirolesi, spesso anche dopo l'anno 1300. L'impulso al gotico nacque nel circolo della vita urbana e apparve per la prima volta in modo indipendente nell'arte [Egg, 1970 p. 46].

Non è facile trovare testimonianze riguardo l'architettura e la storia delle due chiese, che sono state molto probabilmente influenzate dalla costruzione della chiesa di San Michele a Bressanone, già costruita in epoca ottoniana e consacrata nel 1038 dal vescovo Hartwig, poi

rielaborata nei secoli successivi [3]. In quasi tutte le chiese circostanti la città di Bressanone si nota una sovrapposizione di stili, dal tardo-gotico al barocco, che rende spesso difficile la precisa datazione delle varie fasi di ricostruzione e rielaborazione delle chiese stesse. Per quanto riguarda la chiesa di Villandro (fig. 2), sappiamo che fu consacrata nel 1344. In entrambe le chiese si identificano gli influssi del tardo-gotico tirolese, in cui la chiarezza e la linearità delle forme vengono esaltate nei dettagli della lavorazione della pietra, come avviene ad esempio nella volta del coro a Chiusa (fig. 3). Queste forme derivano probabilmente dalle contaminazioni con stile danubiano del tardo-gotico austriaco e della Bassa Baviera, anche se ulteriori studi al riguardo sarebbero necessari per confermare questa ipotesi [4].

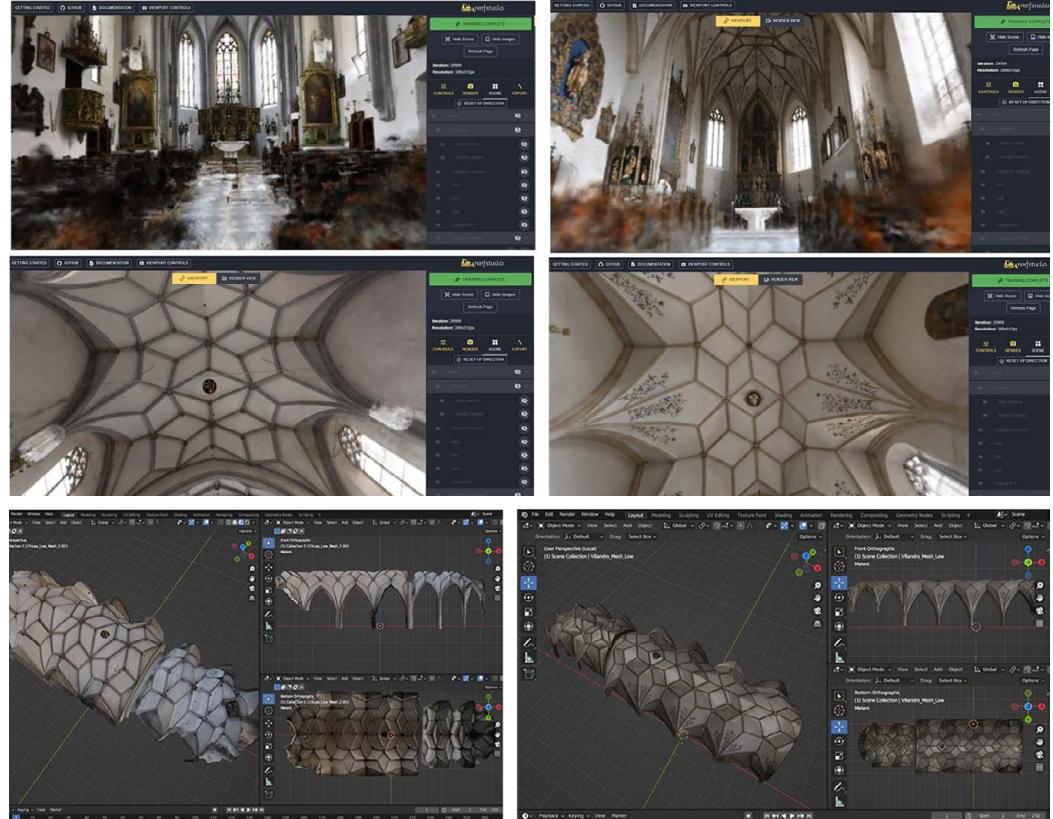


Fig. 4. Elaborazione dei dati sulla piattaforma NerfStudio e i risultati mesh ottenuti.
Elaborazioni degli autori.

Implementazione di algoritmi basati su NeRF e fotogrammetria per la creazione rapida di modelli 3D ad alta qualità

L'accurata documentazione tridimensionale del patrimonio culturale è essenziale per la sua conservazione, studio e divulgazione.

Tuttavia, il processo tradizionale di acquisizione dei modelli 3D, specialmente per strutture complesse come le chiese di Villandro e Chiusa, può richiedere molto tempo e risorse. Questo articolo propone un approccio innovativo che sfrutta gli algoritmi basati su NeRF (Neural Radiance Fields) e la fotogrammetria per creare rapidamente modelli 3D di alta qualità, mantenendo al contempo la precisione metrica.

L'impiego di algoritmi (NeRF) per la digitalizzazione del patrimonio culturale costituisce un approccio ancora solo parzialmente indagato: questa metodologia vede l'utilizzo di una rete neurale che viene opportunamente addestrata a generare e ottimizzare una rappresentazione volumetrica di una scena basata su un insieme di immagini di partenza [Condorelli et al. 2021; Croce et al. 2023].

Originariamente concepita per generare nuove tipologie di *rendering* di una scena tridimensionale, la rappresentazione volumetrica generata dagli algoritmi NeRF può essere convertita in una *mesh* 3D, offrendo quindi uno strumento alternativo alla fotogrammetria tradizionale e alle scansioni 3D. Gli algoritmi NeRF dimostrano una notevole versatilità nel ricostruire oggetti dalla tessitura complessa, come ad esempio superfici metalliche, traslucide o trasparenti, così come oggetti con dettagli intricati. Inoltre, la loro capacità di risolvere ricostruzioni 3D a partire da dati potenzialmente ambigui, come regioni con colori omogenei o pattern di texture ripetitivi, li rende soluzioni promettenti nella ricostruzione del patrimonio culturale. Di seguito viene proposto il flusso di lavoro utilizzato per l'acquisizione e il processamento dei dati: raccolta dei dati fotografici: le chiese di Villandro e Chiusa sono state fotografate utilizzando una fotocamera digitale ad alta risoluzione CANON EOS 6D Mark II da diverse

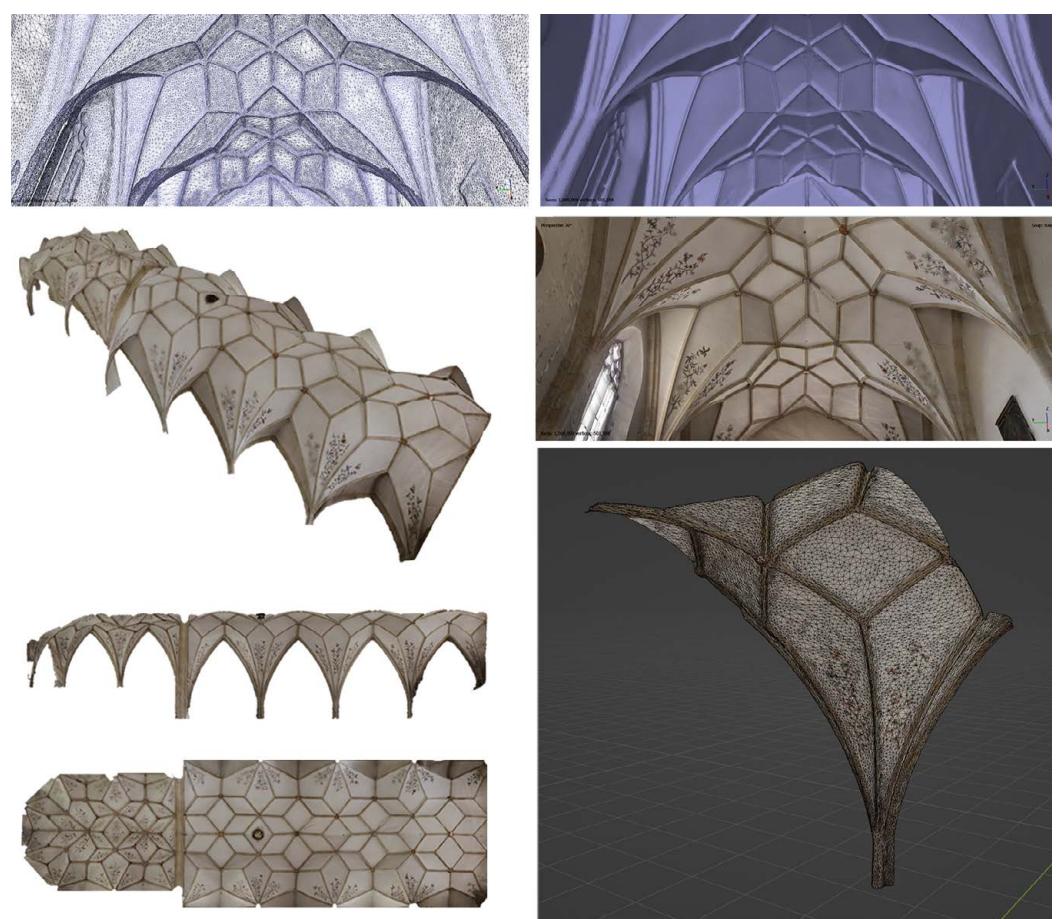


Fig. 5. Fasi di post-processing dei dati in ambiente 3D per la correzione delle *mesh* ottenute da elaborazioni NeRF. Elaborazioni degli autori.

angolazioni; le immagini sono state catturate con una adeguata sovrapposizione (tra 70 e 80%) per garantire una adeguata copertura della superficie dell'edificio da tutti i punti di vista, in particolare delle volte che sono oggetto di studio e comparazione con quelle della chiesa di San Michele a Bressanone; estrazione delle posizioni della fotocamera: sono state identificate ed estratte le caratteristiche salienti dalle immagini utilizzando algoritmi di *feature detection* per l'estrazione e il calcolo delle posizioni della fotocamera, step necessario sia per l'elaborazione con la fotogrammetria sia utilizzando algoritmi NeRF; ricostruzione 3D tramite fotogrammetria e NeRF: per ottenere la nuvola di punti e la *mesh* delle due chiese sono stati utilizzati sia algoritmi SfM, seguendo in particolare la *pipeline* di Colmap, che algoritmi NeRF, scegliendo Nerfacto come algoritmo implementato nella piattaforma Nerfstudio. Entrambi gli algoritmi sono stati utilizzati per la ricostruzione tridimensionale delle due chiese

(fig. 4); fusione dei dati fotogrammetrici e NeRF: i modelli 3D ottenuti da NeRF sono stati integrati con i dati fotogrammetrici per migliorare la precisione metrica e il livello di dettaglio finale. La sovrapposizione dei dati è stata realizzata tramite tecniche di registrazione che allineano i punti di riferimento comuni derivati dalle immagini e dai modelli 3D implementati nel software CloudCompare; valutazione della qualità e precisione metrica: la precisione metrica dei modelli 3D è stata valutata confrontando misurazioni reali con le corrispondenti misurazioni sui modelli virtuali.

Infine, sono state condotte analisi qualitative per valutare la fedeltà visiva dei modelli rispetto alle reali chiese di Villandro e Chiusa (fig. 5).

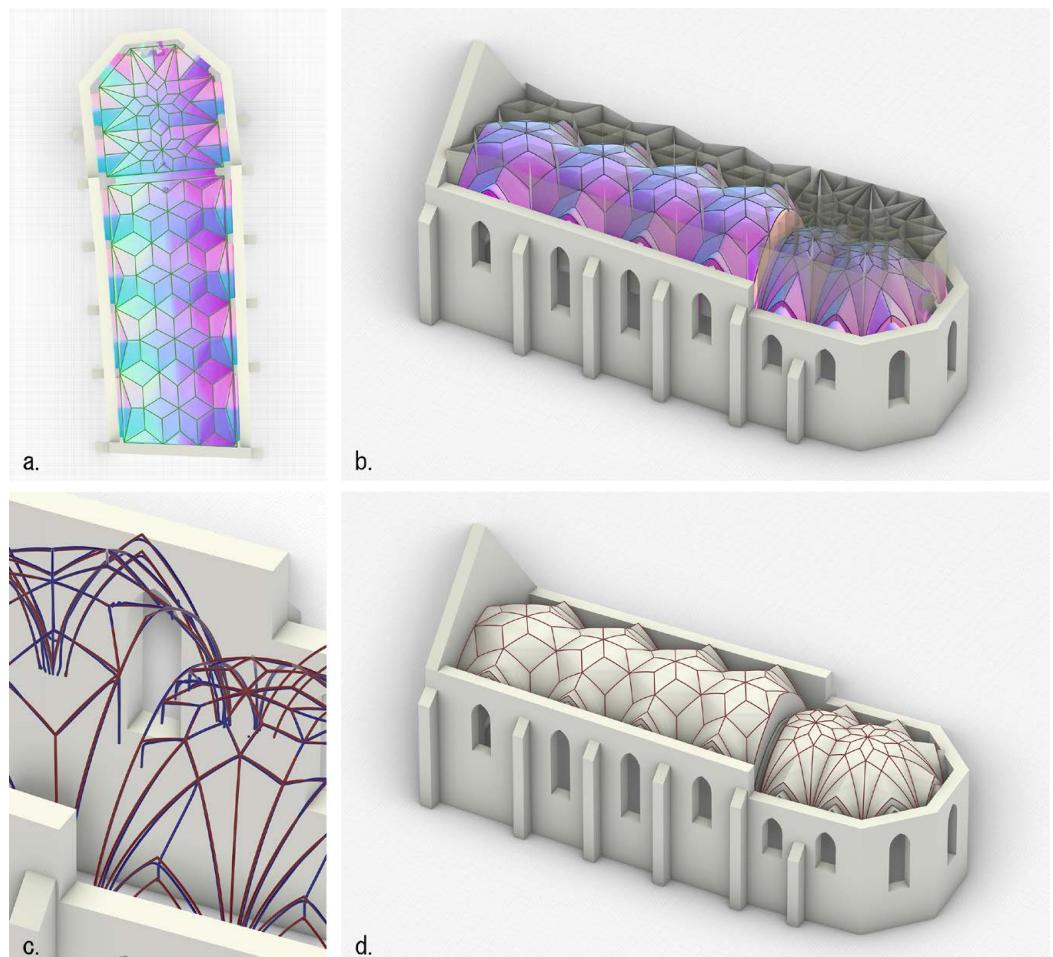


Fig. 6. Processo per la ricostruzione del sistema voltato tardo-gotico della chiesa di San Michele: a. Individuazione del disegno delle nervature (in verde) sulla base dell'analisi delle normali della point cloud. b. Costruzione delle intersezioni (in blu) tra i piani verticali passanti per le nervature e la mesh di rilievo. c. Regolarizzazione delle curve di intersezione per ottenere le curve di sezione ideali (in rosso) aventi la medesima curvatura dove possibile. d. Ricostruzione del sistema voltato. Elaborazioni degli autori.

La ricostruzione digitale del sistema voltato tardo-gotico della Parrocchiale di San Michele

L'analisi dei dati raccolti durante la campagna di rilievo laser scanner condotta nel 2021 ha evidenziato le sfide interpretative derivanti dalla mancanza delle nervature originali; si è reso dunque necessario elaborare un modello interpretativo del sistema voltato utile per ipotizzare la configurazione originaria della chiesa.

A tale scopo, sono state prese in considerazione altre chiese appartenenti allo stesso contesto geografico che presentano un sistema voltato affine a quello della fase tardo-gotica della Parrocchiale di San Michele. In particolare, sono state incluse nello studio le chiese di Chiusa e di Villandro, oltre alla chiesa di Santa Maddalena, al Duomo di Merano e alla chiesa di Santa Maria della Palude a Vipiteno. L'analisi delle corrispondenze geometriche che sussistono tra i

sistemi voltati di queste chiese e quello della Parrocchiale di San Michele ha costituito un passaggio fondamentale per avviare il processo di ricostruzione del sistema voltato tardo-gotico. Il processo metodologico si è pertanto basato su diversi punti chiave: oltre all'interpretazione dei dati acquisiti durante il rilievo digitale della chiesa oggetto dello studio, sono stati presi in considerazione i sistemi di classificazione delle volte gotiche e i modelli di rilievo delle chiese succitate, ottenuti dalle recenti acquisizioni effettuate integrando metodologie SfM e Nerf (Neural radial field) [5].

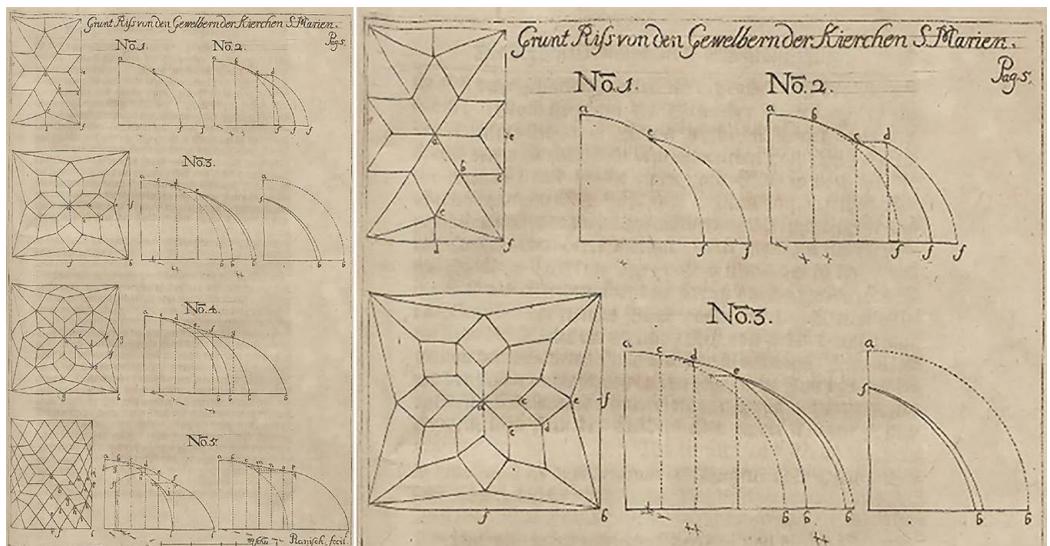


Fig. 7. La tavola con le Netzgewölbe della chiesa di Santa Maria a Dantzig (da: Ranisch 1695), a destra i due schemi che sono molto simili a quelli del sistema voltato della Parrocchiale di San Michele.

L'analisi dei dati elaborati nel contesto del precedente rilievo degli ambienti interni della Parrocchiale di San Michele ha infatti reso possibile interpretare la geometria del sistema voltato celato dagli affreschi realizzati in epoca barocca, facendo emergere la presenza dell'impianto tardo-gotico difficilmente percepibile dall'osservatore. In particolare, il calcolo delle normali della *point cloud* ha messo in evidenza l'andamento delle superfici del sistema tardo-gotico. Sulla base di queste evidenze è stato possibile ricostruire il disegno sul piano di imposta delle costolonature scomparse e quindi ricostruire il sistema voltato (fig. 6), il quale presenta alcune analogie con quello delle chiese di Chiusa e Villandro, circostanza questa che contribuisce a rafforzare le ipotesi avanzate.

Il sistema voltato che è emerso rientra in quelle che in lingua tedesca sono note come *Netzgewölbe*, ovvero le volte a rete, tipiche della tradizione gotica tedesca che, diversamente da quella inglese, francese e spagnola, rinunciava spesso alla suddivisione del sistema voltato in campate tramite archi trasversali [Calvo-López 2020]. Questo tipo di sistema voltato può essere interamente disegnato utilizzando il profilo di sezione di un singolo arco, chiamato *Prinzipalbogen*, ovvero arco principale, come dimostra il metodo proposto da Bartel Ranisch [Ranisch 1695]. In questo modo tutte le nervature presentano la medesima curvatura e questo ha dei notevoli vantaggi in termini di standardizzazione del cantiere [6]. Tra gli schemi di sistemi voltati proposti da Ranisch compaiono due schemi (fig. 7) molto simili a quelli che configurano la campata tipo e la volta del presbiterio e del catino absidale della Parrocchiale di San Michele [7]. Questa circostanza implica la possibilità che lo stesso metodo possa essere stato utilizzato per determinare i profili delle costolonature di questo sistema voltato: questo aspetto è stato tenuto in considerazione nell'ipotesi ricostruttiva.

Le volte gotiche, infatti, prevedevano diversi metodi grafici per la determinazione dell'andamento delle costolonature e delle quote delle chiavi di volta principali e secondarie [8]. Questi metodi variavano a seconda dei vincoli geometrici imposti, tra questi l'andamento della linea di colmo rappresenta il criterio per una prima classificazione di natura geometrica.



Fig. 8. Ipotesi ricostruttiva del sistema voltato basata sulle evidenze dei dati di rilievo e sull'osservazione dei sistemi voltati tipologicamente affini. Pianta e vista assonometrica. Elaborazioni degli autori.

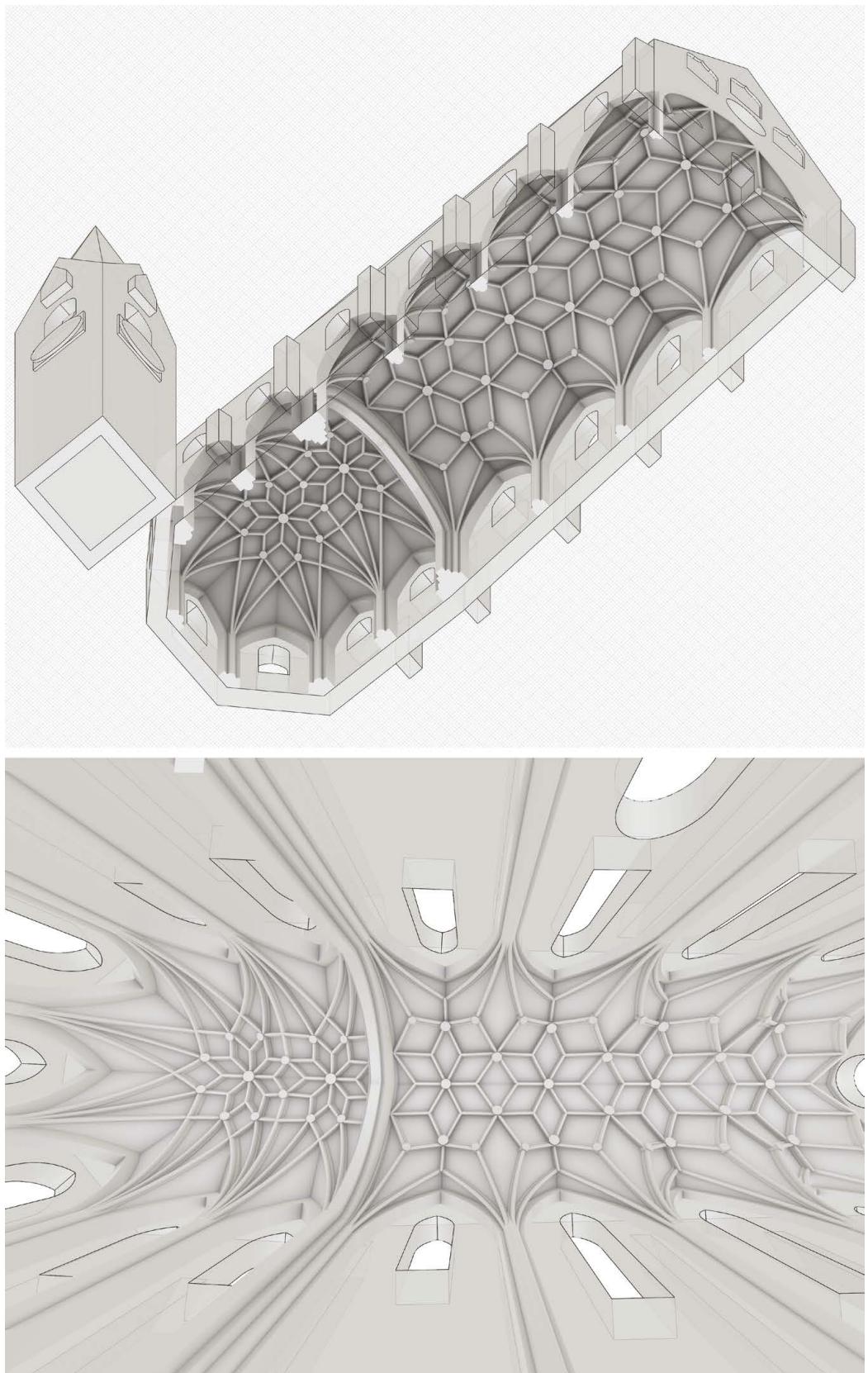


Fig. 9. Viste dal basso dell'ipotesi ricostruttiva del sistema voltato della fase tardo-gotica della Parrocchiale di San Michele. Elaborazioni degli autori.

Infatti, la genesi delle volte medievali può essere ricondotta a due forme primordiali [Capone 2015]: la sfera e il cilindro. Queste sono alla base delle volte con colmo curvilineo, di natura sferoidale, e delle volte con colmo rettilineo orizzontale o inclinato, di natura pseudo-cilindrica. Le volte che compongono il sistema voltato della Parrocchiale di San Michele presentano una natura sferoidale, seppure il colmo della volta principale, longitudinale rispetto alla navata della chiesa, risulti essere orizzontale.

Oltre a questa prima classificazione esistono ulteriori criteri per classificare le volte gotiche, come ad esempio il metodo proposto da Cavallari-Murat [Cavallari-Murat 1955] che si basa sul numero di porzioni in cui ogives e tiercerons [9] suddividono l'angolo α al vertice del quadrilatero di base della volta e sulla quota della chiave di volta rispetto alle chiavi degli archi perimetrali. Relativamente a questa classificazione le volte della navata della chiesa di San Michele rientrerebbero nella classe $\alpha:3$, seppure uno dei due tiercerons sia in realtà una ogives, nervatura che generalmente non compare nelle classi con indice dispari. Questi ragionamenti di carattere tipologico saranno utili per completare la ricostruzione filologica della fase tardo-gotica della chiesa.

Conclusioni

In sintesi, il lavoro ha fornito un approccio metodologico completo grazie al quale è stato possibile avviare la ricostruzione filologica della volta tardo-gotica della chiesa di San Michele (figg. 8, 9), utilizzando dati provenienti da diverse fonti e tecniche avanzate di modellazione 3D.

Per affrontare tali sfide, è stato cruciale sviluppare un modello interpretativo del sistema voltato, prendendo spunto da altre chiese analoghe precedentemente studiate, come la chiesa di Santa Maddalena, il Duomo di Merano e la chiesa di Santa Maria della palude a Vipiteno. Inoltre, le chiese di Chiusa e di Villandro sono state aggiunte allo studio per la loro evidente analogia con le coperture della chiesa di San Michele, contribuendo a rafforzare le ipotesi interpretative precedentemente avanzate. Questo approccio ha permesso di incasellare i sistemi voltati analizzati in categorie distinte, basate sul numero di porzioni in cui le volte sono suddivise, e di individuare diverse tipologie di volte, ciascuna con le proprie caratteristiche distintive.

In questo studio è stata proposta una innovativa metodologia di documentazione tridimensionale del patrimonio culturale, che ha combinato la fotogrammetria con gli algoritmi basati su NeRF (*Neural Radiance Fields*).

L'approccio proposto ha dimostrato di essere efficace nel creare rapidamente modelli 3D di rilievo delle chiese di Villandro e Chiusa, caratterizzati da una qualità adeguata a uno studio di tipo filologico, oltre che a molti altri utilizzi che richiedono modelli scientificamente attendibili.. L'integrazione dei dati ottenuti tramite gli algoritmi basati su NeRF con quelli relativi alla fotogrammetria ha consentito di ottenere risultati più accurati e dettagliati rispetto all'uso indipendente di ciascuna tecnica.

Si è potuto, di conseguenza, avere conferma filologica delle ipotesi già avanzate in precedenza [Luigini et al. 2023] e dare avvio alla successiva fase del progetto che prevede la realizzazione di un modello digitale immersivo per la ricostruzione della configurazione tardo-gotica della Parrocchiale di San Michele Arcangelo a Bressanone.

La metodologia proposta può essere estesa ad altre realtà inerenti alla sfera del patrimonio culturale, facilitando la documentazione e la conservazione di tali importanti risorse storiche, ottimizzando i risultati con notevoli vantaggi sui tempi di elaborazione e, quindi, aumentando l'efficacia delle fasi di studio analitico e filologico.

Note

[1] La documentazione d'archivio contiene infatti un riferimento alla richiesta avanzata dall'autore degli affreschi di eliminare le nervature, per facilitare la tinteggiatura delle superfici [Luigini et al. 2023].

[2] La bibliografia su queste due particolari chiese è piuttosto limitata, si trovano riferimenti alle chiese di Chiusa e Villandro in alcune opere in tedesco, tra cui Egg, 1970; Naredi-Rainer, Madersbacher, 2007; Weingartner 1929. Si ringrazia la Prof.ssa Waltraud Kofler per i suggerimenti.

[3] Gruber, 1987. Si veda a riguardo anche Luigini et al., 2023, pp. 165-174.

[4] Entrambe le chiese sono menzionate in Weingartner, 1977, vol. I, rispettivamente a pag. 276 (Villandro) e brevemente a pp. 162-164.

[5] Per un approfondimento sull'uso di queste tecnologie nell'ambito degli studi relativi ai sistemi voltati si vedano: Agustín-Hernández 2021; Bagnolo et al., 2022; Spallone et al., 2019.

[6] Si veda al riguardo Pliego 2017, nel quale è analizzato il metodo di Ranisch relativamente a tre sistemi voltati di diversa complessità.

[7] Si veda Ranisch 1695, p. 5. Questi stessi disegni sono proposti da Hoffstadt come esempi tipici delle volte nervate adottate in Europa centrale, si veda al riguardo Hoffstadt 1853.

[8] Per un approfondimento sulle volte gotiche, sulla loro evoluzione storica, sulla loro classificazione tipologica e sui metodi grafici adottati per disegnarle, si vedano: Aubert 1934; Bianchini et al. 2020; Bonelli et al. 2012; Breymann 1885; Calvo-López 2020; Cavallari-Murat, 1958; Capone 2014; Choisy 1899; Grodeki 1978; Hoffstadt 1853; Trevisan 2011; Viollet Le Duc 1868.

[9] Questi rientrano tra i termini francesi con cui vengono indicate le diverse nervature: le ogives sono gli archi diagonali che determinano la crociera principale, i tiercerons sono le nervature che spiccano dai capitelli fino a incontrare la chiave di una volta secondaria, le liernes sono le nervature che collegano le chiavi delle volte secondarie con la chiave della volta principale.

Ringraziamenti

Questo studio, condotto dai membri dell' EARTH LAB - *Laboratory for Digital Environments for Education ARTs and Heritage, Libera Università di Bolzano*, è stato finanziato dall'Unione Europea - NextGenerationEU, nell'ambito del progetto INEST - *Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem* (INEST ECS00000043 - CUP I43C22000250006). Le opinioni e i pareri espressi sono esclusivamente quelli degli autori e non riflettono necessariamente quelli dell'Unione europea, né l'Unione europea può essere ritenuta responsabile per essi.

Riferimenti Bibliografici

- Agustín-Hernández L. et al. (2021). From tis point cloud data to geometrical genesis determination of ribbed masonry vaults. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1–2021, pp. 9-16.
- Aubert M. (1934). Les plus anciennes croisées d'ogives, leur rôle dans la construction. In *Bulletin Monumental*, tome 93, I, pp. 5-67.
- Bagnolo V., Argiolas R., Vanini C. (2022). Algorithmic Modelling as a Key Tool for Ribbed Vault Geometry. In *Nexus Network Journal*, 24.1, pp. 147-166.
- Bianchini C. et al. (2020). *Sistemi voltati complessi: geometria, disegno, costruzione | Complex vaulted systems: geometry, design, construction*. Roma: Aracne.
- Bonelli R., Bozzoni C., Franchetti Pardo V. (2012). *Storia dell'architettura medievale*. Roma-Bari: Laterza.
- Breymann G. A. (1885). *Trattato generale di costruzioni civili, con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose*. Milano: Vallard.
- Calvo-López J. (2020). *Stereotomy: Stone Construction and Geometry in Western Europe 1200-1900*, Vol. 4. Cham: Springer.
- Capone M. (2014). La discretizzazione della forma. Genesi e trasformazione: la geometria segreta dei reticolati spaziali delle volte gotiche. In *Disegnare idee e immagini* n. 49, pp. 36-47.
- Cavallari-Murat A. (1958). Intuizione statica ed immaginazione formale nei reticolati spaziali delle volte gotiche nervate. In *Atti della società degli ingegneri e degli architetti di Torino*, 12 (7), pp. 231-254.
- Choisy A. (1899). *Histoire de l'Architecture*. Tome II. Paris: Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire.
- Condorelli F. et al. (2021). A comparison between 3D reconstruction using NeRF neural networks and MVS algorithms on cultural heritage images. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43(B2-2021), pp. 565–570.
- Croce V. et al. (2023). Neural radiance fields (NeRF): review and potential applications to digital cultural heritage. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLVIII-M-2-2023, pp. 453–460.
- Egg E. (1970). *Kunst in Tirol*. Innsbruck: Tyrolia.
- Grodeki L. (1978). *Architettura Gotica*. Milano: Electa.
- Gruber K. (1987). *Pfarrkirche St. Michael Brixen*. Bozen - Lana: Tappainer.
- Hoffstadt F. (1853). *Principii dello stile gotico*. Venezia: Giovanni Brizeghel.
- Luigini A. et al. (2023) The Vaults of the Church of St. Michael the Archangel in Brixen Between Geometry, History and Missed Space. In *Nexus Network Journal*, 25.1, pp. 165-174.

- Naredi-Rainer P, Madersbacher L. (2007). *Kunst in Tirol*. Innsbruck: Tyrolia.
- Ranisch B. (1695). *Beschreibung aller Kirchen-Gebaeude der Stadt Dantzig*. Dantzig: Johann-Zacharias Stollen.
- Spallone R., Vitali M., Natta F. (2019). 3D modelling between ideation, geometry, and surveyed architecture: the case of the vaulted system of 'appartamento di mezzanotte' in palazzo Carignano. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W15*, pp. 1119–1126.
- Trevisan C. (2011). *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*. Roma: Aracne.
- Viollet Le Duc E. (1868). *Dictionnaire Raisonné de l'Architecture Francaise du XI au XVI siècle*. Paris. A. Morel.
- Weingartner J. (1929). *Die Kunstdenkmäler Südtirols*. Wien-Ausburg: Dr. Benno Filsler Verlag.

Autori

Alessandro Luigini, Libera Università di Bolzano, alessandro.luigini@unibz.it.
 Francesca Condorelli, Libera Università di Bolzano, francesca.condorelli@unibz.it.
 Barbara Tramelli, Libera Università di Bolzano, barbara.tramelli@unibz.it.
 Giuseppe Nicastro, Libera Università di Bolzano, giuseppe.nicastro@unibz.it.
 Michela Ceracchi, Libera Università di Bolzano, michela.ceracchi@unibz.it.

Per citare questo capitolo: Luigini Alessandro, Condorelli Francesca, Tramelli Barbara, Nicastro Giuseppe, Ceracchi Michela (2024). Ipotesi di ricostruzione filologica delle volte della Parrocchiale di San Michele Arcangelo a Bressanone: proposta metodologica integrata all'uso delle NeRF/The hypothesis of philological reconstruction of the vaults of the Parish Church of San Michele Arcangelo in Bressanone: a methodological proposal integrated with the use of NeRFs. In Bergamo F, Calandriello A., Ciammaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Transitions. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 3155-3180.

The hypothesis of philological reconstruction of the vaults of the Parish Church of San Michele Arcangelo in Bressanone: a methodological proposal integrated with the use of NeRF

Alessandro Luigini
Francesca Condorelli
Barbara Tramelli
Giuseppe Nicastro
Michela Ceracchi

Abstract

This paper presents a study of the vaulted systems of two churches in South Tyrol, the Parish Church of Chiusa and that of Villandro, analyzing them as models for a hypothesis of philological reconstruction of the vaults of the Parish Church of St. Michael the Archangel in Bressanone. The study proposes an innovative and experimental research methodology that integrates the use of algorithms based on NeRF (Neural Radiance Fields) with Photogrammetry in order to create fast and high-quality 3D models, in the broader context of digitization and valorization of South Tyrol's cultural heritage.

Keywords
vaults, Late Gothic, South Tyrol, NeRF, digital heritage.



Detail of the vaulted system of the church of San Michele Arcangelo in Bressanone.

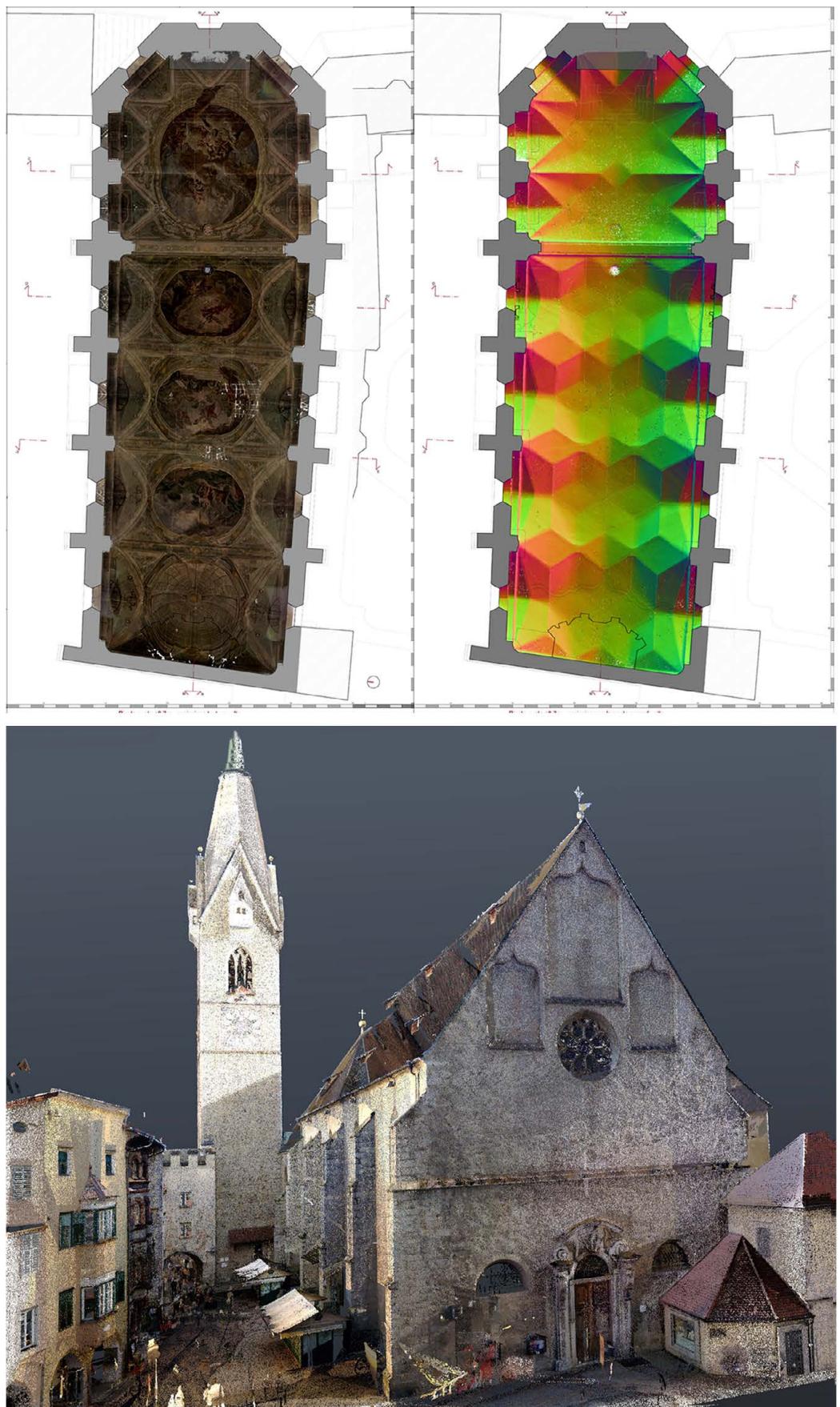


Fig. 1. The church of St. Michael the Archangel in Brixen: top, the plan of the present vaults and the identified late-Gothic layouts. Bottom, a general view of the point cloud. Elaborations by the authors.

Introduction

As already known and reported in a previous state of advancement of the research work [Luigini et al. 2023], the succession of constructive, destructive and linguistic adjustment events in the factory of the Parish of St. Michael saw, at the end of the fifteenth century, the realization of the existing vaulted system and, in the Baroque period, the subsequent removal of the ribs for the realization of the current fresco decoration [1]. The entire cycle of frescoes determines a pictorial spatiality of a purely Baroque type, superimposed without attempts at integration, except for the removal of the ribs, on the remaining late Gothic structure.

The survey by laser scanner and both terrestriil and aerial photogrammetry allowed the identification of the residual portions of the late Gothic stellate vaults (fig. 1), now concealed from view by the pictorial spatiality, and the reconstruction of the texture of the ribs required a study of a philological nature, the methodology and initial results of which are presented here.



Fig. 2. Villandro (BZ): the parish church of Santo Stefano. Pictures by the authors.

The paper focuses on the South Tyrolean architectural heritage by examining two case studies, namely the parishes of Chiusa and Villandro: using new digital technologies, the research team created three-dimensional models of the structures of both churches in order to facilitate the study and the comprehension of the various phases of construction and reworking of their respective architectures.

This work in progress is part of the broader context of the use of digital technologies for the preservation, study, and enjoyment of cultural heritage, focusing on an architectural reality

that is not well known and studied in the field of art history and digital humanities. This paper is divided into three parts: an initial art-historical introduction of the two churches examined, a state-of-the-art analysis of 3D reconstructions with a focus on the methodology used, and a discussion of the advantages of this research approach as well as future research prospects [Luigini et al. 2023, pp. 165–174].



Fig. 3. Chiusa (BZ):
the parish church of
Sant'Andrea. Pictures by
the authors.

The churches of Chiusa and Villandro between late Gothic and new stylistic influences

The churches of Chiusa and Villandro are typical examples of late Tyrolean Gothic architecture, in which the leading artists and architects proved for both buildings to follow the changing stylistic influences from the Germanic area and especially from Lower Bavaria, transforming and readjusting these impulses to the unmistakable Tyrolean style, characterized by simplicity of external forms and stylistic influence from various periods.

The churches give us a vivid picture of a typical place and art that bear witness to the crossroads of artistic influences in the region [3].

Tyrol received the Gothic as an almost fully developed style, because as long as it was still developing, Romanesque art reigned supreme in the Tyrolean valleys, often even after the year 1300. The impulse to the Gothic was born in the circle of urban life, which first appeared independently in art [Egg 1970, p. 46].

It is not easy to find evidence regarding the architecture and history of the two churches, which were most likely influenced by the construction of San Michele Church in Brixen, already built in Ottonian times and consecrated in 1038 by Bishop Hartwig, then reworked in later centuries [3]. In almost all the churches surrounding the city of Brixen there is an

overlapping of styles, from late Gothic to Baroque, which often makes it difficult to precisely date the various phases of reconstruction and reworking of the churches themselves. As for the church in Villandro (fig. 2), we know that it was consecrated in 1344. In both churches we can identify the influences of late Tyrolean Gothic, in which the clarity and linearity of forms are enhanced in the details of the stonework, as is the case, for example, in the choir vault in Klausen (fig. 3). These forms probably derive from the contaminations with Danubian style of Late Gothic in Austria and Lower Bavaria, although more studies on this would be needed to confirm this hypothesis [4].

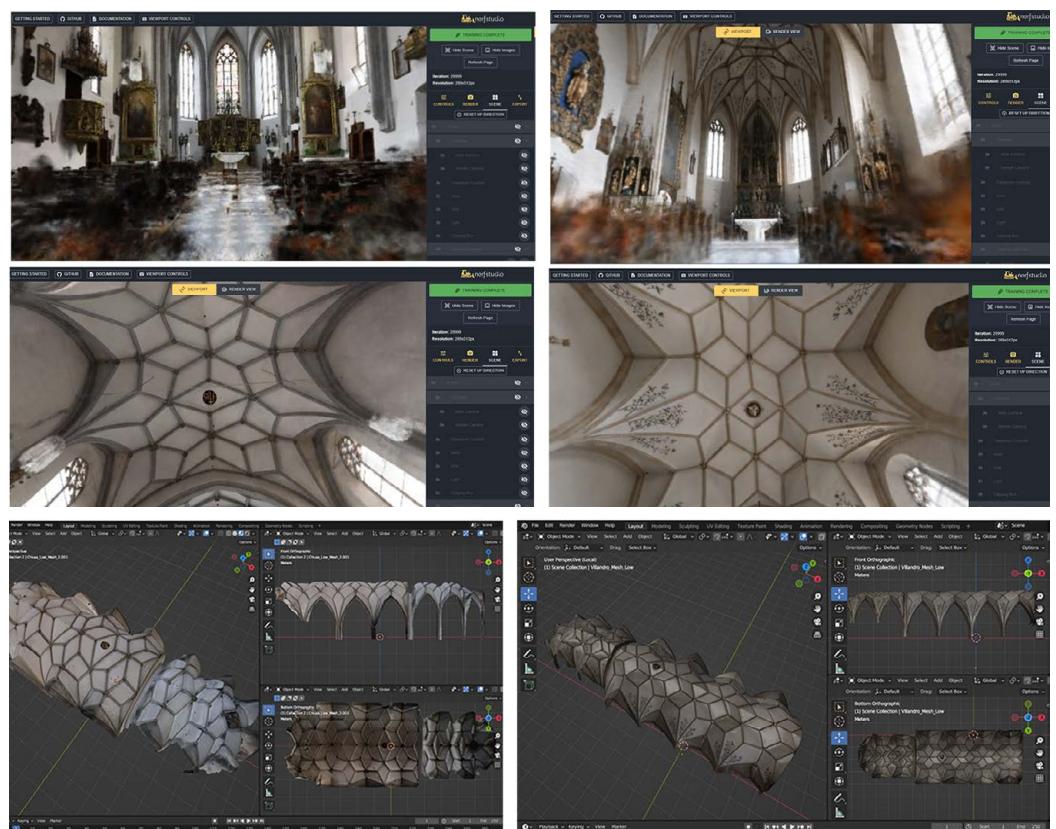


Fig. 4. Data processing on the NerfStudio platform and the mesh results obtained. Elaborations by the authors.

Implementation of algorithms based on NeRF and photogrammetry for rapid creation of high-quality 3D models

Accurate three-dimensional documentation of cultural heritage is essential for its preservation, study and dissemination.

However, the traditional process of acquiring 3D models, especially for complex structures such as the churches of Villandro and Chiusa, can be very time and resource consuming. This paper proposes an innovative approach that leverages Neural Radiance Fields (NeRF)-based algorithms and photogrammetry to rapidly create high-quality 3D models while maintaining metric accuracy.

The use of algorithms (NeRF) for the digitization of cultural heritage constitutes an approach that is still only partially investigated: this methodology sees the use of a neural network that is properly trained to generate and optimize a volumetric representation of a scene based on a set of source images [Condorelli et al. 2021; Croce et al. 2023].

Originally designed to generate new types of renderings of a three-dimensional scene, the volumetric representation generated by NeRF algorithms can be converted into a 3D mesh,

thus offering an alternative tool to traditional photogrammetry and 3D scans. NeRF algorithms demonstrate remarkable versatility in reconstructing objects with complex textures, such as metallic, translucent or transparent surfaces, as well as objects with intricate details. In addition, their ability to solve 3D reconstructions from potentially ambiguous data, such as regions with homogeneous colors or repetitive texture patterns, makes them promising solutions in cultural heritage reconstruction.

The workflow used for data acquisition and processing is proposed below: photographic data collection: the churches of Villandro and Chiusa were photographed using a CANON EOS 6D Mark II high-resolution digital camera from different angles. Images were captured with adequate overlap (between 70 and 80 percent) to ensure adequate coverage of the building surface from all points of view, particularly of the vaults that are being studied and

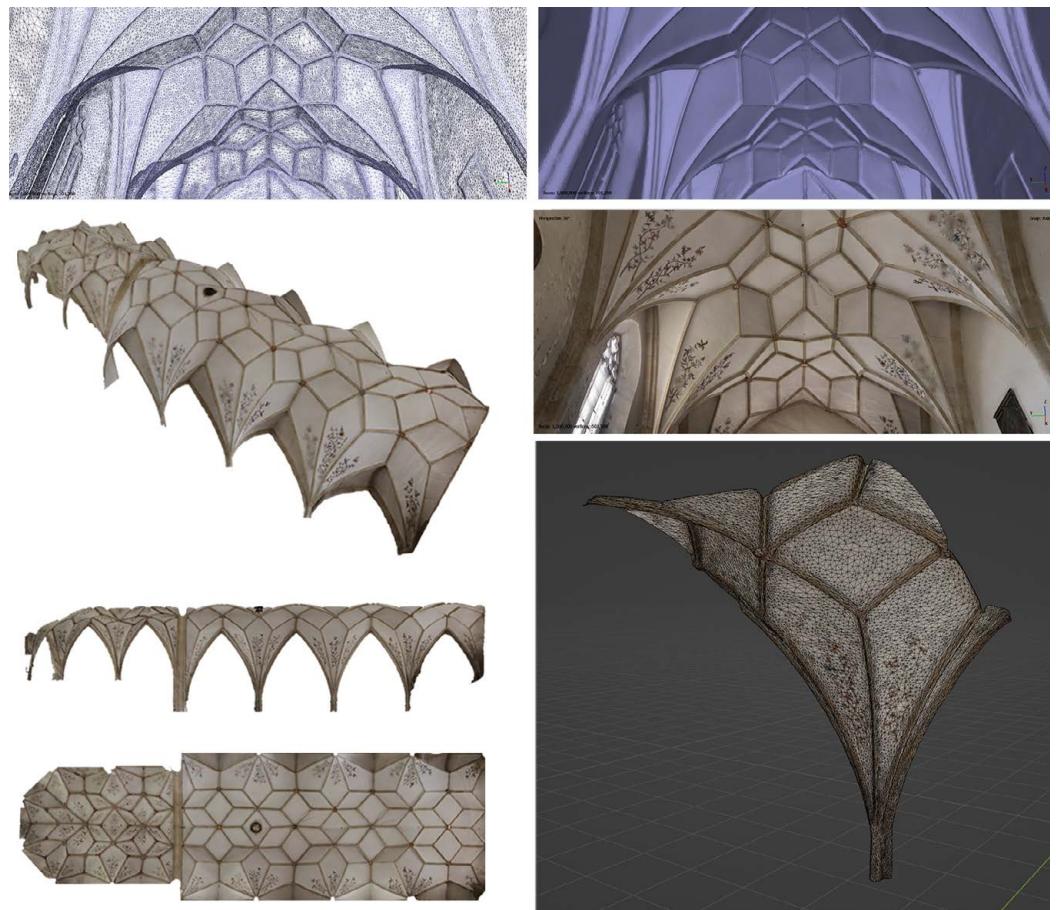


Fig. 5. Post-processing steps in a 3D environment for correction of meshes obtained from NeRF processing. Elaborations by the authors.

compared with those of the church of San Michele in Bressanone; extraction of camera positions: salient features were identified and extracted from the images using feature detection algorithms for the extraction and calculation of camera positions, a necessary step for both processing with photogrammetry and using NeRF algorithms; 3D reconstruction using photogrammetry and NeRF: Both SfM algorithms were used to obtain the point cloud and mesh of the two churches, specifically following the Colmap pipeline, and NeRF algorithms, choosing Nerfacto as the algorithm implemented in the Nerfstudio platform. Both algorithms were used for the three-dimensional reconstruction of the two churches (fig. 4); fusion of photogrammetric and NeRF data: the 3D models obtained from NeRF were integrated with photogrammetric data to improve the metric accuracy and final level of detail. Data overlay was achieved by registration techniques that align common landmarks derived from

the images and 3D models implemented in the CloudCompare software; quality assessment and metric accuracy: the metric accuracy of the 3D models was assessed by comparing real measurements with corresponding measurements on the virtual models.

Finally, qualitative analyses were conducted to assess the visual fidelity of the models to the real churches of Villandro and Chiusa (fig. 5).

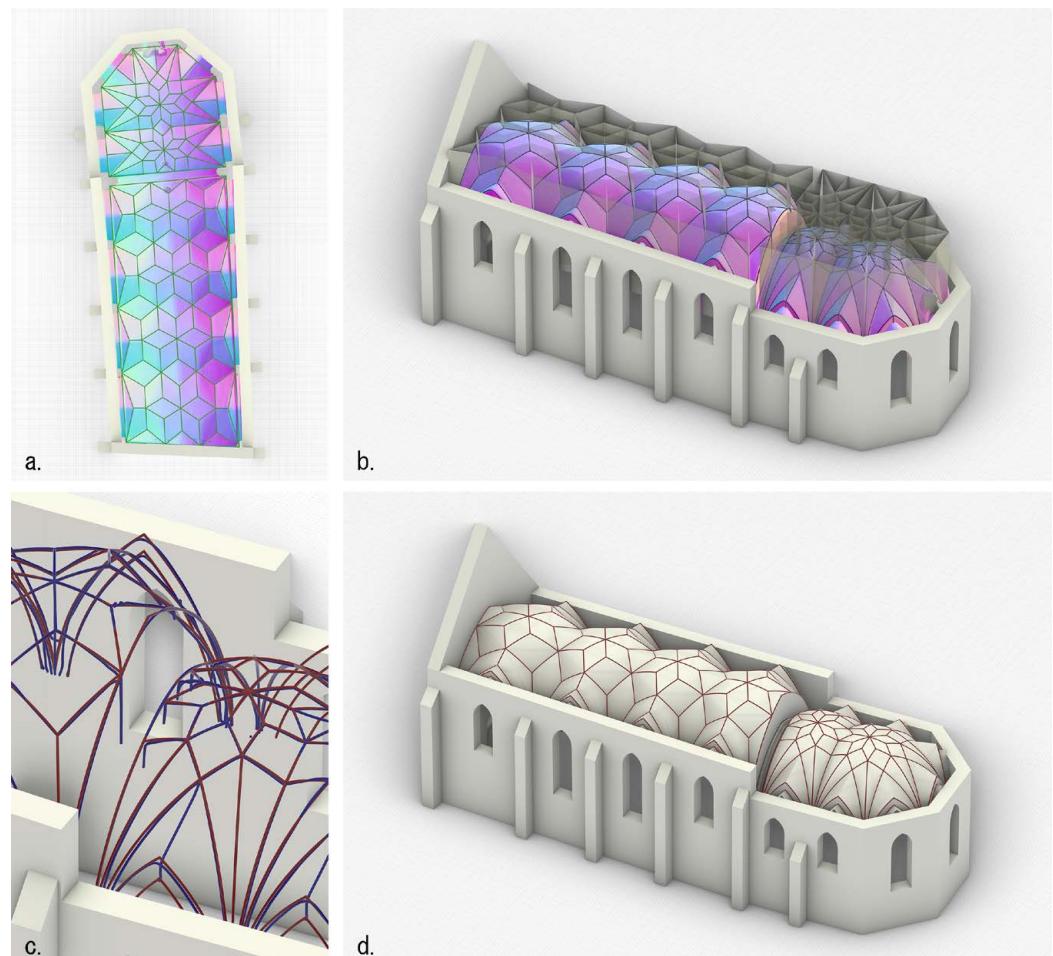


Fig. 6. Process of reconstruction of the late Gothic vaulted system of St. Michael's Parish Church: a. Identification of the ribs layout (green) based on the analysis of the point cloud normals. b. Construction of the intersections (blue) between the vertical planes passing through the ribs and the survey mesh. c. Adjustment of the intersection curves to obtain the ideal section curves (red) having the same curvature where possible. d. Reconstruction of the vaulted system. Elaborations by the authors.

Digital reconstruction of the late Gothic vaulted system of St. Michael's Parish Church

The analysis of data collected during the laser scanner survey campaign conducted in 2021 highlighted the interpretive challenges arising from the lack of the original ribs; therefore, it became necessary to develop an interpretive model of the vaulted system useful to hypothesize the original configuration of the church.

For this purpose, other churches in the same geographical context that exhibit a vaulted system similar to that of the late Gothic phase of St. Michael's Parish Church were considered. In particular, the Church of Chiusa and that of Villandro were included in the study, in addition to the Church of Santa Maddalena, the Merano Cathedral, and Santa Maria della Palude in Vipiteno. The analysis of the geometric correspondences that exist between the vaulted systems of these churches and that of St. Michael's Parish Church was a key step to initiate the process of reconstructing the late Gothic vaulted system.

Therefore, the methodological process was based on several key points: in addition to the interpretation of the data acquired during the digital survey of the church under study, the

classification systems of the Gotich vaults and the 3D survey models of the above-mentioned churches, obtained from the recent acquisitions made by integrating SfM and Nerf (Neural radial field) methodologies [5], were taken into account.

In fact, the analysis of the data processed in the context of the previous survey of the interior spaces of St. Michael's Parish Church made it possible to interpret the geometry of the vaulted system concealed by the frescoes painted in the Baroque period, revealing the presence of the late Gotich system that is difficult for the observer to perceive. In particular, the

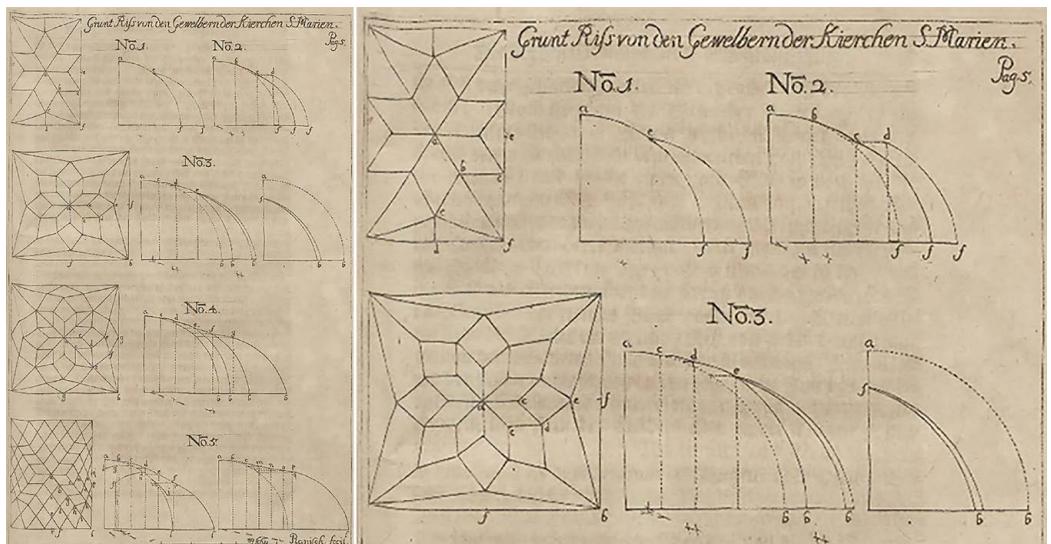


Fig. 7. The Table with the Netzgewölbe of St. Mary's Church in Dantzig (from: Ranisch 1695). On the right, two patterns similar to those in the vaulted system of St. Michael's Parish Church.

calculation of point cloud normals highlighted the surface pattern of the late-Gothic system. Based on this evidence, it was possible to reconstruct the layout on the impost plane of the vanished ribs and then reconstruct the vaulted system (fig. 6), which shows some similarities with that of the churches of Chiusa and Villandro, a circumstance that contributes to strengthening the advanced hypotheses.

The vaulted system that has emerged falls under what are known in the German language as Netzgewölbe, or net vaults, which are typical of the German Gothic tradition that, unlike the English, French and Spanish traditions, often renounced the subdivision of the vaulted system into bays using transverse arches [Calvo-López, 2020]. This type of vaulted system can be entirely designed using the section profile of a single arch, called Prinzipalbogen, or main arch, as demonstrated by the method proposed by Bartel Ranisch [Ranisch 1695]. In this way all ribs have the same curvature, and this has significant advantages in terms of standardization of the site [6]. Among the diagrams of vaulted systems proposed by Ranisch appear two diagrams (Fig. 7) very similar to those that configure the type of bay and vault of the chancel and apse conch of St. Michael's Parish [7]. This circumstance entails the possibility that the same method may have been used to determine the profiles of the ribs of this vaulted system: this aspect was taken into account in the reconstructive hypothesis.

Gothic vaults, in fact, required various graphical methods for determining the course of the ribs and elevations of the main and secondary keystones [8]. These methods varied according to the geometric constraints imposed, among them the course of the ridge line being the criterion for an initial classification of a geometric nature. In fact, the genesis of medieval vaults can be traced back to two primordial forms [Capone 2015]: the sphere and the cylinder. These form the basis of vaults with a curvilinear ridge, of spheroidal nature, and vaults with a rectilinear horizontal or inclined ridge, of pseudo-cylindrical nature. The vaults that make up the vaulted system of St. Michael's Parish present a spheroidal nature, although the ridge of the main vault, longitudinal to the nave of the church, appears to be horizontal.



Fig. 8. Reconstructive hypothesis of the vaulted system based on the evidence from the survey data and the observations of related system. Floor plan and axonometric view. Elaborations by the authors.

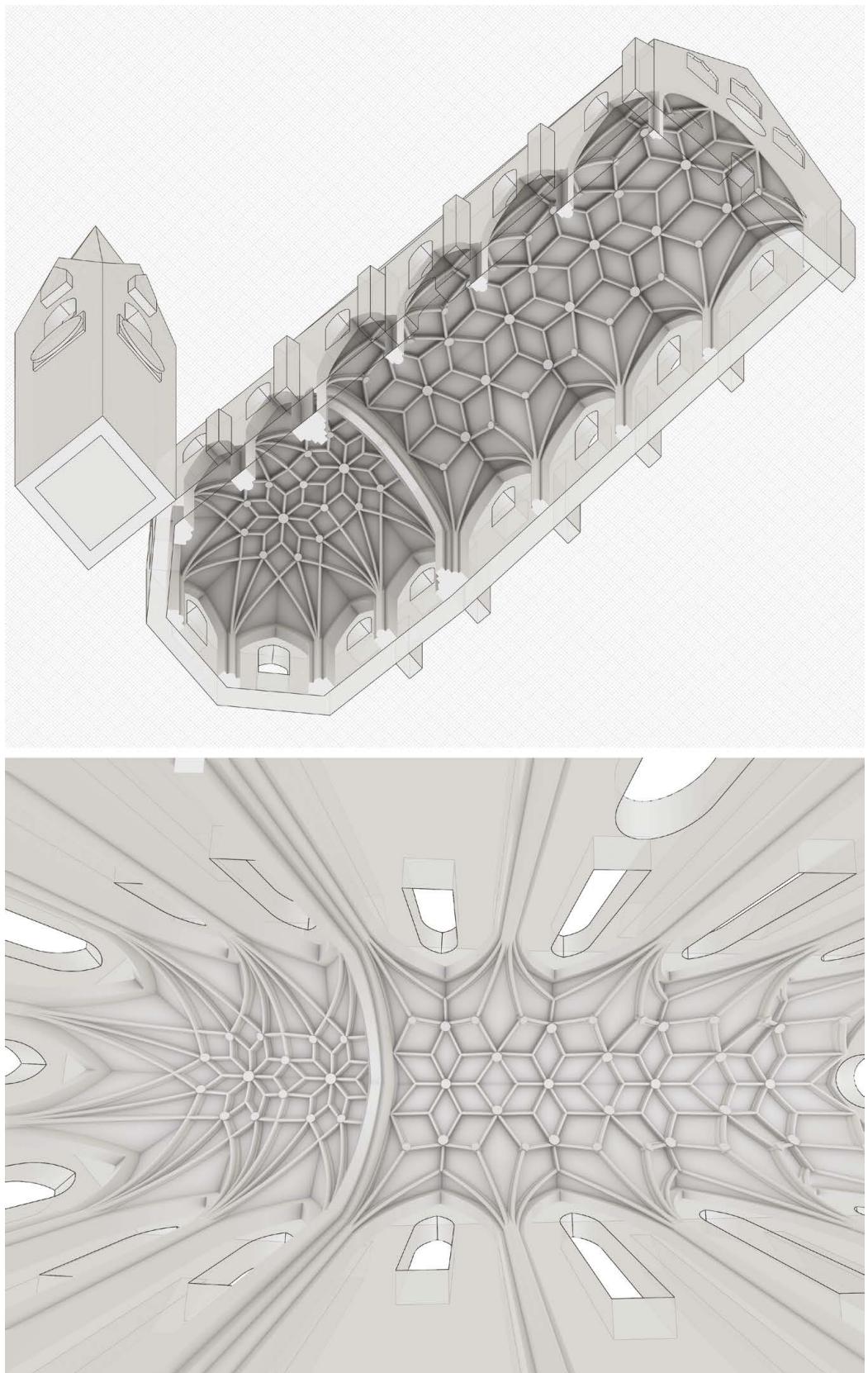


Fig. 9. Views from below of the reconstructive hypothesis of the vaulted system of the late Gothic phase of St. Michael's Parish Church. Elaborations by the authors.

In addition to this first classification, there are other criteria for classifying Gothic vaults, such as the method proposed by Cavallari-Murat [Cavallari-Murat, 1955], which is based on the number of portions into which ogives and tiercerons [9] subdivide the angle α at the apex of the base quadrilateral of the vault and on the elevation of the keystone relative to the keys of the perimeter arches. Relative to this classification, the vaults of the nave of St. Michael's Church would fall into the $\alpha:3$ class, although one of the two tiercerons is in fact an ogives, a rib that generally does not appear in classes with an odd index. These typological reasonings will be useful for completing the philological reconstruction of the late Gothic phase of the church.

Conclusions

In conclusion, the work provided a comprehensive methodological approach thanks to which it was possible to initiate the philological reconstruction of the late Gothic vaulting of the Church of San Michele (figs. 8, 9), using data from various sources and advanced 3D modeling techniques.

To address these challenges, it was crucial to develop an interpretive model of the vaulted system, taking cues from other similar churches previously studied, such as the Church of Santa Maddalena, the Cathedral of Merano, and the church of Santa Maria della Palude in Vipiteno. In addition, the churches of Chiusa and Villandro were added to the study because of their obvious similarity to the roofs of the church of San Michele, helping to strengthen the previously advanced interpretive hypotheses. This approach made it possible to frame the vaulted systems analyzed into distinct categories, based on the number of portions into which the vaults are divided, and to identify different types of vaults, each with its own distinctive characteristics.

In this study, an innovative three-dimensional documentation methodology for cultural heritage was proposed, which combined photogrammetry with Neural Radiance Fields (NeRF)-based algorithms.

The proposed approach proved to be effective in quickly creating 3D survey models of the churches of Chiusa and Villandro, characterized by a quality suitable for a philological study, as well as many other purposes that require scientifically reliable models. The integration of data obtained through NeRF-based algorithms with those related to photogrammetry enabled more accurate and detailed results than using each technique independently.

As a result, it was possible to have philological confirmation of previously advanced hypotheses [Luigini et al. 2023] and to initiate the next phase of the project, which involves the creation of an immersive digital model for the reconstruction of the late Gothic configuration of the Parish of San Michele Arcangelo in Bressanone.

The proposed methodology can be extended to other realities inherent in the cultural heritage sphere, facilitating the documentation and preservation of such important historical resources, optimizing results with significant advantages on processing time and, thus, increasing the effectiveness of analytical and philological study phases.

Notes

[1] In fact, the archival documentation contains a reference to the request made by the author of the frescoes to eliminate the ribs in order to facilitate the painting of the surfaces. See Luigini et al. 2023.

[2] The bibliography on these two particular churches is rather limited; references to the churches of Chiusa and Villandro can be found in a few works in German, including Egg 1970; Naredi-Rainer Madersbacher 2007; Weingartner 1929. We thank Prof. Waltraud Kofler for suggestions.

[3] Gruber 1987. See also in this regard Luigini et al. 2023, pp. 165-174.

[4] Both churches are mentioned in Weingartner 1977, vol. I, respectively on p. 276 (Villander) and briefly on pp. 162-164.

[5] For more on the use of these technologies in the context of studies related to vaulted systems see: Agustín-Hernández 2021; Bagnolo et al. 2022; Spallone et al. 2019.

[6] See in this regard Pliego 2017, in which Ranisch's method is analyzed with respect to three vaulted systems of different complexity.

[7] See Ranisch 1695, p. 5. These same designs are proposed by Hoffstadt as typical examples of the ribbed vaults adopted in Central Europe, see in this regard Hoffstadt 1853.

[8] For an in-depth study of Gothic vaults, their historical evolution, their typological classification, and the graphic methods adopted to draw them, see: Aubert 1934; Bianchini et al. 2020; Bonelli et al. 2012; Breymann 1885; Calvo López 2020; Cavallari-Murat 1958; Capone 2014; Choisy 1899; Grodeki 1978; Hoffstadt 1853; Trevisan 2011; Viollet Le Duc 1868.

[9] These are among the French terms by which the different ribs are referred to: the *ogives* are the diagonal arches that determine the main cross, the *tiercerons* are the ribs that protrude from the capitals until they meet the key of a secondary vault, and the *lierne*s are the ribs that connect the keys of the secondary vaults with the key of the main vault.

Acknowledgements

This study carried out by the members of EARTH LAB - *Laboratory for Digital Environments for Education ARTs and Heritage*, Free University of Bolzano/Bozen, was funded by the European Union - NextGenerationEU, in the framework of the iNEST - *Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem* (INEST ECS00000043 – CUP I43C22000250006). The views and opinions expressed are solely those of the authors and do not necessarily reflect those of the European Union, nor can the European Union be held responsible for them.

References

- Agustín-Hernández L. et al. (2021). From tis point cloud data to geometrical genesis determination of ribbed masonry vaults. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1–2021, pp. 9-16.
- Aubert M. (1934). Les plus anciennes croisées d'ogives, leur rôle dans la construction. In *Bulletin Monumental*, tome 93, 1, pp. 5-67.
- Bagnolo V., Argiolas R., Vanini C. (2022). Algorithmic Modelling as a Key Tool for Ribbed Vault Geometry. In *Nexus Network Journal*, 24.1, pp. 147-166.
- Bianchini C. et al. (2020). *Sistemi voltati complessi: geometria, disegno, costruzione | Complex vaulted systems: geometry, design, construction*. Roma: Aracne.
- Bonelli R., Bozzoni C., Franchetti Pardo V. (2012). *Storia dell'architettura medievale*. Roma-Bari: Laterza.
- Breymann G. A. (1885). *Trattato generale di costruzioni civili, con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose*. Milano: Vallard.
- Calvo-López J. (2020). *Stereotomy: Stone Construction and Geometry in Western Europe 1200-1900*, Vol. 4. Cham: Springer.
- Capone M. (2014). La discretizzazione della forma. Genesi e trasformazione: la geometria segreta dei reticolati spaziali delle volte gotiche. In *Disegnare idee e immagini* n. 49, pp. 36-47.
- Cavallari-Murat A. (1958). Intuizione statica ed immaginazione formale nei reticolati spaziali delle volte gotiche nervate. In *Atti della società degli ingegneri e degli architetti in Torino*, 12 (7), pp. 231-254.
- Choisy A. (1899). *Histoire de l'Architecture*. Tome II. Paris: Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire.
- Condorelli F. et al. (2021). A comparison between 3D reconstruction using NeRF neural networks and MVS algorithms on cultural heritage images. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43(B2-2021), pp. 565–570.
- Croce V. et al. (2023). Neural radiance fields (NeRF): review and potential applications to digital cultural heritage. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLVIII-M-2-2023, pp. 453–460.
- Egg E. (1970). *Kunst in Tirol*. Innsbruck: Tyrolia.
- Grodeki L. (1978). *Architettura Gotica*. Milano: Electa.
- Gruber K. (1987). *Pfarrkirche St. Michael Brixen*. Bozen - Lana: Tappainer.
- Hoffstadt F. (1853). *Principii dello stile gotico*. Venezia: Giovanni Brizghel.
- Luigini A. et al. (2023) The Vaults of the Church of St. Michael the Archangel in Brixen Between Geometry, History and Missed Space. In *Nexus Network Journal*, 25.1, pp. 165-174.
- Naredi-Rainer P., Madersbacher L. (2007). *Kunst in Tirol*. Innsbruck: Tyrolia.
- Ranisch B. (1695). *Beschreibung aller Kirchen-Gebäude der Stadt Dantzig*. Dantzig: Johann-Zacharias Stollen.
- Spallone R., Vitali M., Natta F. (2019). 3D modelling between ideation, geometry, and surveyed architecture: the case of the vaulted system of 'appartamento di mezzanotte' in palazzo Carignano. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W15, pp. 1119–1126.

- Trevisan C. (2011). *Per la storia della stereotomia. Geometrie, metodi e costruzioni*. Roma: Aracne.
- Viollet Le Duc E. (1868). *Dictionnaire Raisonné de l'Architecture Francaise du XI au XVI siècle*. Paris. A. Morel.
- Weingartner J. (1929). *Die Kunstdenkmäler Südtirols*. Wien-Ausburg: Dr. Benno Filsler Verlag.

Authors

Alessandro Luigini, Free University of Bozen-Bolzano, alessandro.luigini@unibz.it.
Francesca Condorelli, Free University of Bozen-Bolzano, francesca.condorelli@unibz.it.
Barbara Tramelli, Free University of Bozen-Bolzano, barbara.tramelli@unibz.it.
Giuseppe Nicastro, Free University of Bozen-Bolzano, giuseppe.nicastro@unibz.it.
Michela Ceracchi, Free University of Bozen-Bolzano, michela.ceracchi@unibz.it.

To cite this chapter: Luigini Alessandro, Condorelli Francesca, Tramelli Barbara, Nicastro Giuseppe, Ceracchi Michela (2024). Ipotesi di ricostruzione filologica delle volte della Parrocchiale di San Michele Arcangelo a Bressanone: proposta metodologica integrata all'uso delle NeRF/The hypothesis of philological reconstruction of the vaults of the Parish Church of San Michele Arcangelo in Bressanone: a methodological proposal integrated with the use of NeRFs. In Bergamo F., Calandriello A., Ciamaichella M., Friso I., Gay F., Liva G., Monteleone C. (a cura di). *Misura / Dismisura. Atti del 45° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Measure / Out of Measure. Proceedings of the 45th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 3155-3180.