

drawing disegnare

n. 68
idee immagini
ideas images

Rivista semestrale del Dipartimento di Storia, disegno
e restauro dell'architettura – Sapienza Università di Roma
*Biannual Journal of the Department of History, representation
and restoration of architecture – Sapienza Rome University*

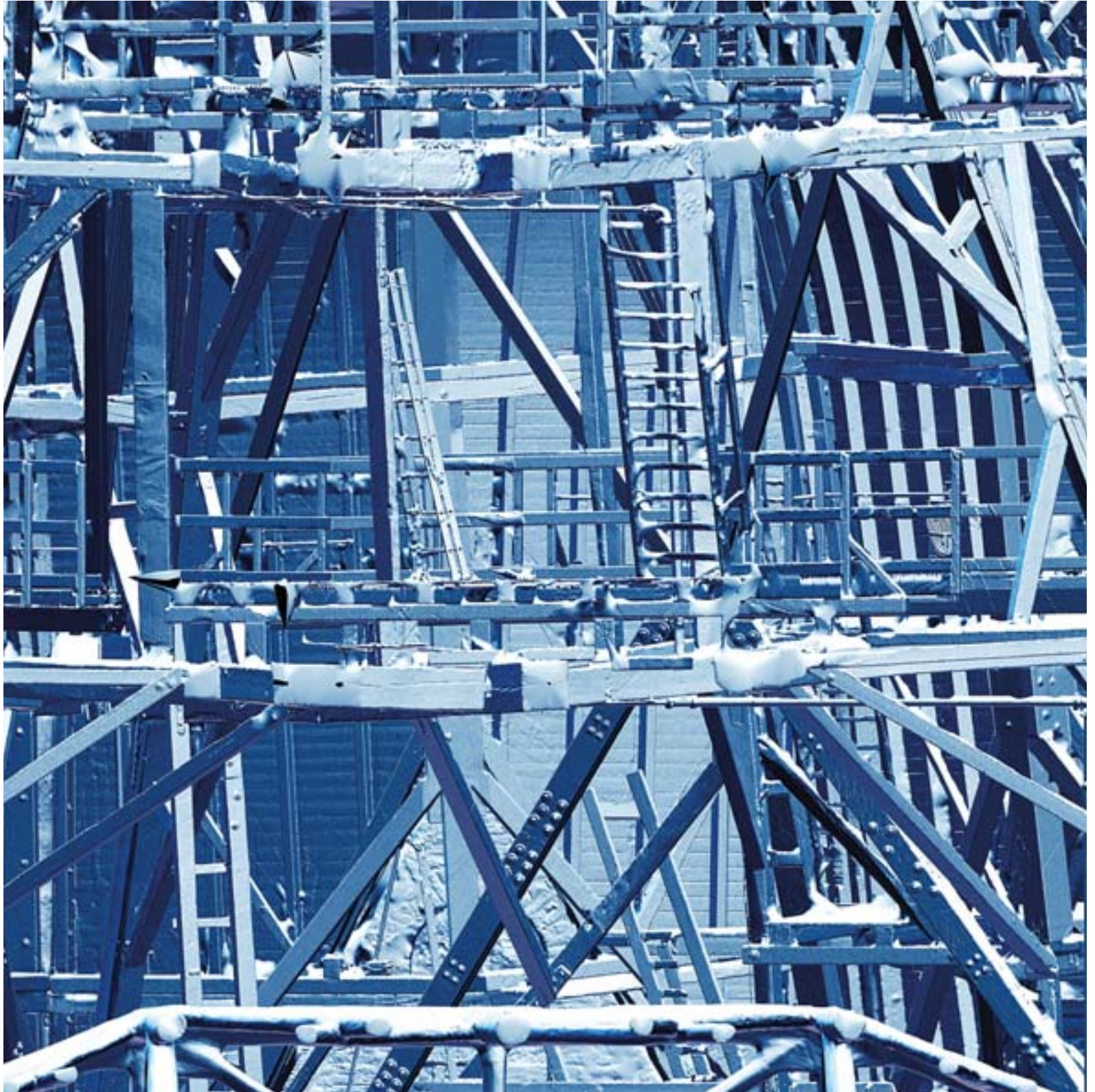
Worldwide distribution and digital version EBOOK
www.gangemeditore.it

Full english text



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Anno XXXV, n. 68/2024
€ 15,00 - \$/£ 20.00





Rivista semestrale del Dipartimento di Storia, disegno e restauro dell'architettura, pubblicata con il contributo di Sapienza Università di Roma
Biannual Journal of the Department of History, representation and restoration of architecture, published with the contribution of Sapienza Rome University

Registrazione presso il Tribunale di Roma n. 00072 dell'11/02/1991

© proprietà letteraria riservata

GANGEMI EDITORE[®]
INTERNATIONAL

via Giulia 142, 00186 Roma
tel. 0039 06 6872774 fax 0039 06 68806189

e-mail info@gangemieditore.it
catalogo on line www.gangemieditore.it

Le nostre edizioni sono disponibili in Italia e all'estero anche in versione ebook.

Our publications, both as books and ebooks, are available in Italy and abroad.

Un numero € 15,00 – estero € 20,00 / \$/£ 24.00
Arretrati € 30,00 – estero € 40,00 / \$/£ 48.00

Abbonamento annuo € 30,00 –
estero € 35,00 / \$/£ 45.00

One issue € 15,00 – Overseas € 20,00 / \$/£ 24.00
Back issues € 30,00 – Overseas € 40,00 / \$/£ 48.00

Annual Subscription € 30,00 –
Overseas € 35,00 / \$/£ 45.00

Abbonamenti/Annual Subscription

Versamento sul c/c postale n. 15911001
intestato a Gangemi Editore SpA
IBAN: IT 71 M 076 0103 2000 0001 5911 001
Payable to: Gangemi Editore SpA
post office account n. 15911001
IBAN: IT 71 M 076 0103 2000 0001 5911 001
BIC SWIFT: BPPIITRRXXX

Distribuzione/Distribution

Librerie in Italia e all'estero/
Bookstores in Italy and overseas
Emme Promozione e Messaggerie Libri Spa – Milano
e-mail: segreteria@emmegromozione.it
www.messaggerielibri.it

Edicole in Italia e all'estero/
Newsstands in Italy and overseas
Bright Media Distribution Srl
e-mail: info@brightmediadistribution.it

Abbonamenti/Annual Subscription

EBSCO Information Services
www.ebscohost.com

ISBN 978-88-492-5280-4
ISSN IT 1123-9247

Finito di stampare nel mese di giugno 2024
Gangemi Editore Printing

Direttore scientifico/Editor-in-Chief

Mario Docci
Sapienza Università di Roma
piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia
mario.docci@uniroma1.it

Direttore responsabile/Managing editor

Carlo Bianchini
Sapienza Università di Roma
piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia
carlo.bianchini@uniroma1.it

Comitato Scientifico/Scientific Committee

Alonzo Addison, *University of California, Berkeley, USA*
Piero Albisinni, *Sapienza Università di Roma, Italia*
Eduardo Antonio Carazo Lefort, *Universidad de Valladolid, Spagna*
Fabiana Carbonari, *Universidad de La Plata, Argentina*
Pilar Chías, *Universidad de Alcalá, Spagna*
Francis D.K. Ching, *Seattle, USA*
Livio De Luca, *CNRS - Centre National de la Recherche Scientifique, Francia*
Marco Gaiani, *Università di Bologna, Italia*
Fernando Gandolfi, *Universidad de La Plata, Argentina*
Natalia Jorquera Silva, *Universidad del La Serena, Cile*
Joubert José Leacha, *Universidade de São Paulo, Brasile*
Cornelie Leopold, *Technische Universität Kaiserslautern, Germania*
Riccardo Migliari, *Sapienza Università di Roma, Italia*
Douglas Pritchard, *Robert Gordon University, Scozia*
Franco Purini, *Sapienza Università di Roma, Italia*
Mario Santana-Quintero, *Carleton University, Canada*

Comitato di Redazione/Editorial Staff

Laura Carlevaris (coordinatore)
Emanuela Chiavoni, Laura De Carlo,
Carlo Inglese, Alfonso Ippolito, Luca Ribichini

Staff edizione multimediale/Multimedia edition Staff

Marina Attenni, Adriana Caldarone, Flavia Camagni,
Marika Griffò, Sofia Menconero

Coordinamento editoriale e segreteria/Editorial coordination and secretarial services

Monica Filippa

Redazione/Editorial office

piazza Borghese 9, 00186 Roma, Italia
tel. 0039 6 49918890
disegnare@uniroma1.it

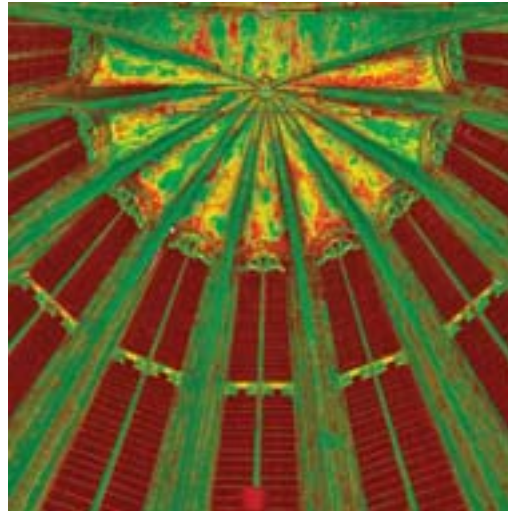
In copertina/Cover

Cattedrale di Aachen. Vista 3D delle strutture di sostegno della cupola esterna (elaborazione di Douglas Pritchard)
Aachen Cathedral. 3D model of the supporting structures of the outer dome (by Douglas Pritchard).

Anno XXXIV n. 68, giugno 2024

- 3 Editoriale di Mario Docci, Carlo Bianchini
La Cattedrale di Aachen, studi e ricerche
Editorial by Mario Docci, Carlo Bianchini
Aachen Cathedral, studies and research
- 7 Jan Richarz
L'importanza di un modello 3D per la Cattedrale di Aachen
The importance of a 3D model for Aachen Cathedral
- 12 Yannick Ley
L'evoluzione della Cattedrale di Aachen in sedici immagini
The evolution of Aachen Cathedral in sixteen figures
- 20 Douglas Pritchard
La documentazione della Cattedrale di Aachen: approcci integrati per la conservazione digitale utilizzando Terrestrial Laser Scanning e fotogrammetria
The documentation of Aachen Cathedral: integrated approaches for digital preservation using Terrestrial Laser Scanning and photogrammetry
- 38 Bruno Schindler
La geometria della Cappella Palatina di Aachen e il sistema di misurazione pratica applicato in cantiere
The geometry of the Aachen Palatine Chapel and the practical measurement system on the building site
- 56 Carlo Bianchini
Sulle unghie coniche della Cappella Palatina di Aachen
The conical vaults in the Palatine Chapel in Aachen
- 72 Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffò
Sperimentazioni di Machine Learning per la mappatura della Cattedrale di Aachen
Machine Learning experiments for mapping Aachen Cathedral
- 90 Rilievo geometrico e architettonico: disegni tratti dal portfolio
Geometric and architectural survey: drawings from the portfolio

Cattedrale di Aachen. Vista texturizzata della nuvola
di punti del Coro gotico (elaborazione di Marika Griffò).
*Aachen Cathedral. Texturized view of the points cloud
of the Gothic Choir (by Marika Griffò).*





La Cattedrale di Aachen, studi e ricerche

Il presente numero di *Disegnare. Idee Immagini* abbandona temporaneamente la sua consueta impostazione “collettanea” divenendo eccezionalmente monografico.

Un evento questo del tutto straordinario per la nostra rivista, che trova un solo precedente nel numero 18 interamente dedicato in quel caso all’Anfiteatro Flavio.

Come in quell’occasione, dunque, anche questa volta ci occupiamo di un singolo, straordinario episodio, la Cattedrale di Aachen, e in particolare della Cappella Palatina di Carlo Magno la cui rilevanza ben giustifica l’eccezionalità della scelta editoriale.

È infatti quasi superfluo ricordare come la Cappella Palatina rappresenti non solo un impareggiabile capolavoro nella storia dell’architettura e dell’arte occidentale, ma anche il simbolo della prima “rinascita” politica e culturale pienamente “europea” dopo la caduta dell’Impero Romano d’Occidente.

Infatti la scelta di Carlo Magno di stabilire ad Aachen la sede permanente del Sacro Romano Impero non solo comporta la rottura con il tradizionale modello germanico di corte itinerante, ma determina nel contempo la necessità di realizzare “ex-novo” un complesso palatino capace sia di rispondere alle varie esigenze dettate dall’attività di governo sia soprattutto di rendere manifesto il progetto politico-culturale dell’imperatore.

La Cappella Palatina – attualmente incorporata nel più vasto complesso della Cattedrale – simboleggia questo snodo cruciale della storia dell’Europa occidentale segnando, dal punto di vista architettonico, la nascita di un nuovo linguaggio che ambisce in qualche modo a superare le tradizioni romana e bizantina senza tuttavia contraddirle.

I numerosissimi studi che precedono quelli raccolti in questo numero della rivista hanno già messo in luce molte delle caratteristiche del complesso palatino e, in questo senso, i contributi che qui presentiamo si inseriscono certamente in questo stesso filone scientifico. È bene tuttavia mettere in luce come essi siano anche un primo, significativo risultato di un vasto progetto di ricerca internazionale che ha completato tra il 2022 e il 2023 una sistematica campagna di rilevamento integrato dell’intero complesso.

Questa attività, sviluppata anche nel quadro del PNRR (PE5 CHANGES, Spoke 8) e che ha visto coinvolti il Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell’Architettura di Sapienza, la Robert Gordon University di Aberdeen, la Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule di Aachen in partnership con la Dombauhütte della Cattedrale, ha messo a disposizione degli studiosi un’inedita e molto affidabile nuvola di punti 3D che documenta più del 95% delle superfici dell’intero complesso.

Sebbene l’applicazione integrata delle tecnologie LiDAR, SLAM, di fotogrammetria terrestre e da drone sia ormai da considerarsi una sorta di standard nelle attività di rilevamento, ciò nondimeno raggiungere un grado di ricopertura così elevato rappresenta in qualche modo un cambio di paradigma anche rispetto al recente passato.

Per prima cosa, esso dimostra la fattibilità di una documentazione così estensiva con tempi e costi ragionevoli. Inoltre, tale approccio supera quel concetto di un rilevamento *just enough* (concentrato cioè solo sulle parti facilmente rilevabili o di interesse contingente) in favore di una documentazione la più esaustiva possibile, omogenea in termini di accuratezza e in un formato digitale che ambisce a rendersi indipendente dal software utilizzato. Al di là dei benefici singolarmente apportati da questi aspetti, il loro combinato apre di fatto le porte alla reale possibilità di considerare il monumento stesso come una “fonte”, ossia quale documento su cui basare analisi e interpretazioni.

Questo discorso sembra da un lato banale (in quanto è ovvio che ogni interpretazione di un monumento non possa che essere basata sul monumento stesso!) e dall’altro un po’ tecnicista, come se l’impiego dei sistemi digitali e di acquisizione 3D massiva fosse condizione sufficiente per ottenere questo risultato.

La lora “massività” sufficiente certamente non è; ma necessaria forse sì, nella misura in cui essa diviene elemento abilitante per ricerche che sfruttano una base dati omogenea e trascurabilmente affetta dalle inevitabili soggettività introdotte dagli operatori nella scelta e misura di singoli punti.

Questi concetti, apparentemente astratti, innestati come criteri metodologici nella nostra campagna di rilevamento hanno prodotto già un primo (notevole a nostro avviso) risultato nella fase di lettura del manufatto consentendoci di rivelare un'inedita serie di volte coniche nell'ambulacro superiore della Cappella Palatina. Un'anomalia mai messa in luce prima e che non sarebbe stato possibile apprezzare senza avere a disposizione una nuvola 3D con le caratteristiche di cui abbiamo già ampiamente parlato.

Poiché crediamo che scoperte come quella di Aachen non siano da considerarsi episodiche, l'aggiornamento ai nuovi standard di rilevamento e la conseguente sempre maggiore disponibilità di dati affidabili fornirà certamente nuove occasioni anche per mettere alla prova ipotesi storicamente consolidate circa la forma e geometria degli oggetti architettonici oltre che per rivelare caratteristiche semplicemente non individuabili con approcci più tradizionali.

Non va inoltre trascurato un altro aspetto poco considerato: una nuvola di punti 3D come quella di cui abbiamo fin qui parlato diviene di fatto una "foto 3D" dell'oggetto precisamente collocata nel tempo. In questo senso, i dati che produciamo oggi diverranno in qualche decennio quello che per noi sono oggi i disegni e le foto storiche, ossia fonti preziose per i nostri studi. Questo fatto introduce nelle campagne di rilevamento una componente etica a nostro avviso non irrilevante.

In realtà le nuvole 3D andranno ben al di là di questo, poiché le letture che esse consentiranno travalicheranno il contesto dell'architettura e, in questa direzione, cominciano ad accumularsi evidenze inaspettate. Ne è un esempio il progetto Urban Model of Glasgow (<<https://data.glasgow.gov.uk/pages/3d-urban-model>>) con cui il Glasgow City Council ha avviato da ormai un ventennio la documentazione 3D del centro città: i dati delle prime scansioni del 2005, obsoleti dal punto di vista architettonico in quanto superati dalle successive campagne di rilevamento, stanno invece divenendo preziosissimi strumenti nel settore delle *digital humanities* per la loro capacità di fornire dati affidabili (a suo tempo "collateralmente" fissati nelle nuvole 3D) riguardo agli stili di vita, agli oggetti d'uso e perfino alla moda.

Concludiamo allora con un rapido sguardo al contenuto di questo numero che ospita in apertura "il punto di vista della Cattedrale", ossia una presentazione di quali benefici il progetto ha portato e potrà portare nella gestione anche quotidiana del monumento che, giova ricordarlo, è inserito nella World Heritage List UNESCO; a seguire uno spazio dedicato alla iconografia storica del complesso di Aachen. La sezione più scientifica si apre con la descrizione/discussione di dettaglio delle campagne di rilevamento svolte, cui segue un primo contributo analitico che propone un'ipotesi suggestiva circa la matrice costruttiva e l'unità di misura usata per la Cappella Palatina. I due articoli successivi che chiudono il numero 68 riguardano rispettivamente la già citata questione delle volte coniche e un'applicazione del *Machine Learning* alla mappatura delle superfici della Cattedrale.

Un'offerta ancora una volta ricca che speriamo verrà apprezzata dai nostri lettori.

Mario Docci, Carlo Bianchini

editorial

Aachen Cathedral, studies and research

The current issue of Disegnare. Idee Immagini temporarily departs from its usual miscellaneous format in favour of a monographic one. This is a rare event for our journal; the only other monographic issue was no. 18, dedicated entirely to the Flavian Amphitheatre.

As on that occasion, we once again focus on a single, extraordinary subject: the Cathedral in Aachen and, more specifically, Charlemagne's Palatine Chapel – so significant it fully justifies our unique editorial choice. The Palatine Chapel is not only an unrivalled masterpiece of Western art and architecture, it is also a symbol of the first truly 'European' political and cultural renaissance following the fall of the Western Roman Empire.

Charlemagne's decision to choose Aachen as the permanent seat of the Holy Roman Empire broke with the traditional Germanic model of an itinerant court and led to the creation of an entirely new palatial complex. The latter was designed to not only address the diverse needs of governance, but also embody the Emperor's political and cultural vision.

The Palatine Chapel, now incorporated into the larger cathedral, symbolises this transformative moment in history of Western Europe. Architecturally speaking it marks the birth of a new language that sought to transcend Roman and Byzantine traditions, albeit respecting their heritage.

Numerous studies performed before the ones published in this issue have already highlighted many features of the palatial complex. While the papers presented here belong to the same scholarly tradition, it is important, however, to emphasise that they also represent the first significant products of a major international research project that involved a systematic integrated survey campaign of the entire complex, conducted between 2022 and 2023.

This initiative, carried out also within the framework of the NRRP (PE5 CHANGES, Spoke 8), involved the Department of History, Representation and Restoration of Architecture at Sapienza University, the Robert Gordon University in Aberdeen, and the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, in partnership with the Dombauhütte of the Cathedral. The project provided researchers with an unprecedentedly reliable 3D points cloud of over 95% of the building's surfaces.

While the integrated use of LiDAR, SLAM, terrestrial and UAV photogrammetry is now considered standard practice in surveying, achieving such extensive coverage represents a paradigm shift, even when compared to recent advancements.

Firstly, it demonstrates the feasibility of producing comprehensive documentation within reasonable timeframes and budgets. In addition, this approach moves away from the traditional 'just enough surveying' mindset (i.e., that prioritises easily accessible areas or specific parts of interest) in favour of documentation that is as exhaustive and accurate as possible, presented in a format that aspires to be software-independent. Quite apart from the individual benefits achieved by these aspects, their combination paves the way for the truly revolutionary possibility of being able to treat the monument as a primary 'source', in other words a document upon which we can directly base analyses and interpretations.

This concept may appear both self-evident (since any interpretation of a monument must, of course, be based on the monument itself) and overly technicist, implying that 3D scanning systems alone are sufficient to achieve this result. While the 'massive capabilities' of these systems are insufficient on their own, they are undoubtedly necessary since they enable research based on data which is only minimally influenced by the biases that an operator inevitably introduces when selecting and measuring individual points.

These seemingly abstract concepts were embedded as methodological criteria in our survey campaign and have already yielded significant results. For instance, during the analysis phase, we uncovered a previously unnoticed series of conical vaults in the upper ambulatory of the Palatine Chapel. This anomaly, never before identified, would have remained hidden without access to a 3D points cloud with the characteristics outlined earlier.

We believe that such discoveries should not be considered isolated occurrences. The adoption of new surveying standards and the resulting increased availability of reliable data will

undoubtedly provide further opportunities to challenge long-established hypotheses about the shape and geometry of architectural objects. Moreover, these technologies can reveal features that cannot be detected with traditional tools.

Another often overlooked aspect is that a 3D points cloud adhering to the discussed standards becomes, in essence, a '3D photograph' of the object, capturing it at a specific moment in its history. The data we produce today will, in a few decades, hold the same value for future studies as historical drawings and photographs hold for us now. This introduces an ethical dimension to surveying campaigns that we consider far from negligible.

Indeed, the use of 3D point clouds extend well beyond architectural contexts. Unexpected insights are already emerging, as demonstrated by the Urban Model of Glasgow Project (<<https://data.glasgow.gov.uk/pages/3d-urban-model>>), implemented in the last two decades by Glasgow City Council to document the city centre in 3D. Data from the initial 2005 scans, now outdated for architectural analysis, have unexpectedly become invaluable for digital humanities research, offering reliable information, captured within those 3D point clouds, about everyday life, objects, and even fashion trends.

We'll conclude with a brief overview of this issue's contents. This issue opens with 'the Cathedral's perspective', detailing the benefits this project has already provided and will continue to provide regarding the monument's daily management. Let us not forget that Aachen Cathedral is a UNESCO World Heritage Site; it is followed by a focus on the historical iconography of the Aachen Cathedral complex.

The scientific section begins with a comprehensive discussion of the survey campaigns, followed by a paper presenting a compelling hypothesis regarding the construction matrix and unit of measurement used for the Palatine Chapel. The final two articles address the newly identified conical vaults and the application of machine learning to the mapping of the cathedral's surfaces. Once again, we present a rich compendium which we hope will be appreciated by our readers.

Translation by Carlo Bianchini

Mario Dozzi, Carlo Bianchini

Jan Richarz

L'importanza di un modello 3D per la Cattedrale di Aachen *The importance of a 3D model for Aachen Cathedral*



<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-02.pdf>

Quale uno dei primi dodici siti riconosciuti Patrimonio dell'Umanità, la Cattedrale di Aachen è dal 1978 uno degli edifici più importanti al mondo. Fin dalla sua costruzione l'edificio ha affascinato e suscitato interesse. Trattandosi della chiesa cattedrale della diocesi di Aachen, ha anche una rilevante funzione come luogo di culto; ogni anno viene visitata da 1,4 milioni di persone, ciascuna con i propri specifici interessi.

Trattandosi di un sito Patrimonio dell'Umanità nutriamo, in quanto Fabbrica della Cattedrale, un notevole interesse nella documentazione del nostro patrimonio edilizio e siamo sempre al centro dell'attenzione delle autorità competenti in materia di monumenti e delle autorità politiche e del mondo scientifico.

Volendo utilizzare tecnologie innovative per ottenere i migliori risultati possibili per la conservazione della Cattedrale ma essendo dotati di risorse limitate in termini di personale e di disponibilità finanziarie, difficilmente possiamo svolgere questo imponente lavoro da soli e siamo felici di poter mettere in atto importanti collaborazioni con istituti e università che operano in quasi tutti i settori; le tecnologie sono all'avanguardia e gli studiosi che lavorano agli aspetti tecnologici sono spinti dalla nostra stessa sete di conoscenza.

Diamo un breve sguardo alla storia della documentazione della Cattedrale.

Per quanto riguarda lo sviluppo planimetrico dell'edificio carolingio possiamo trarre conclusioni solo sulla base delle scoperte scientifiche, poiché non si conservano disegni originali.

Le prime immagini conosciute della Cattedrale risalgono infatti al XII-XIII secolo; una di esse è quella incisa sulla copertura del reliquiario che custodisce i resti di Carlo Magno, realizzato prima del 1215.

Avvicinandoci al periodo gotico, troviamo incisi nel coro, come base di lavoro per gli scalpellini dell'epoca, disegni della decorazione e delle volte.

Alcune incisioni realizzate negli anni successivi ci forniscono informazioni pittoriche sull'edificio anche se in queste opere si nota sempre una certa libertà artistica; processi di idealizzazione, distorsioni, interpretazioni e

a volte evidenti errori degli artisti obbligano a un approccio critico a queste fonti iconografiche. È presumibile poi che durante i tre incendi della città, l'ultimo dei quali risale al 1656, e a causa delle diverse guerre siano andate perdute altre raffigurazioni più antiche¹.

Negli ultimi duecento anni è stata realizzata una infinita quantità di disegni e di fotografie che rappresentano la Cattedrale in diversi modi; in questa raccolta iconografica si combinano pianificazione, documentazione e esigenze di tipo turistico.

Negli ultimi decenni, con gli ulteriori sviluppi nella tecnologia di rilevamento, i gruppi di ricerca si sono ripetutamente impegnati nel realizzare una documentazione il più possibile completa mediante rappresentazioni bidimensionali. I disegni realizzati per la Cattedrale rispecchiano chiaramente lo sviluppo tecnologico che ha riguardato l'ambito del rilevamento architettonico. Con l'ulteriore sviluppo della tecnologia di rilevamento, negli ultimi decenni i team di progetto si sono ripetutamente adoperati per documentare il complesso nel modo più completo possibile mediante planimetrie. I disegni realizzati per la Cattedrale di Aquisgrana, ad esempio, mostrano chiaramente lo sviluppo della tecnologia di rilievo degli edifici. Se guardiamo indietro solo di circa venticinque anni, vediamo che abbiamo, ad esempio, una serie completa di planimetrie all'avanguardia registrate fotogrammetricamente dall'Istituto di Geodesia dell'Università RWTH di Aachen e convertite in CAD, che hanno costituito la base per tutti gli interventi sull'edificio fino alla creazione di un nuovo modello.

Il ruolo e l'importanza di un modello della Cattedrale ottenuto tramite scansione

Da un punto di vista economico, non saremo stati in grado di optare per una nuova campagna di documentazione della Cattedrale in quanto le nostre risorse non sarebbero state sufficienti per un'attività completa qualitativamente elevata.

La questione dell'utilizzo dei dati è a volte di importanza secondaria in ambito scien-

As one of the first twelve World Heritage Sites, Aachen Cathedral has been one of the world's most important buildings since 1978. Since its construction, the building has fascinated and interested people. As the cathedral church of the diocese of Aachen, it also has a very important function as a place of worship. Up to 1.4 million people visit the Cathedral every year, each with their different interest.

As a World Heritage Site, we ourselves naturally have a great interest in the documentation of our building stock and are always in the focus of the monument authorities, politics and science.

Our premise is that we want to use innovative technology to achieve the best possible results for the preservation of the cathedral. We can hardly carry out this extensive work ourselves with limited personnel and financial capacities and are therefore happy to work closely with colleges and universities in almost all areas. The state of the art there is up to date and the people working on the technology are driven by the same thirst for knowledge that drives us. Let's take a brief look at the history of the documentation of Aachen Cathedral.

We can only draw conclusions about the Carolingian building plan on the basis of research findings; drawings have not survived. The earliest known illustrations of the building date from the 12th to 13th centuries, one of which is engraved in the roof of Charlemagne's shrine from before 1215, in which Charlemagne's bones are preserved. If, on the other hand, we approach the Gothic period, we find in the choir hall, for example, incised drawings of the tracery and vaulting as a working basis for the stonemasons of the time. Some engravings from later years provide us with pictorial information about the building, whereby artistic freedom can always be seen there. Idealizations, distortions, interpretations and sometimes clear mistakes by the artists force us to take a critical approach to these sources. During three town fires, the last in 1656, and several wars, other older depictions were presumably lost.¹

Over the last 200 years, a wide range of drawings and photographs have been created

that depict the cathedral in a variety of ways. Planning, documentary and tourist interests are combined in this collection.

With the further development of surveying technology, project teams have repeatedly endeavoured to document the inventory as completely as possible in plan drawings over the past decades. The drawings produced for Aachen Cathedral, for example, clearly show the development of technology in building surveying. If we look back only about 25 years, we see that we have, for example, a complete set of state of the art plans photogrammetrically recorded by the Institute of Geodesy at RWTH Aachen University and converted into CAD, which formed the basis for all construction work on the building until a new model was created.

How a scan model of the Cathedral makes sense

From an economic perspective, we would not have been able to opt for new documentation at first. Our own funds would not have been sufficient for the complete documentation of the cathedral in a high-quality form. The question of the perspective of use is sometimes of secondary importance in the scientific field. However, it is essential for us as the Cathedral's building lodge that we have a planning basis with which we can provide good support for extensive projects. In principle, it would still be possible to work with the existing set of plans. The question therefore arises as to what added value a 3D model offers us compared to the existing plan and the conventional methodology. We can't just stick to the fact that we now have a beautiful, presentable and in some places admirably perfectionist model, but we have to consider what we want to achieve with it and how it can be implemented in our work. There are various objectives at the Cathedral. Broadly speaking, these are Open Access Heritage, tourism and building conservation. Of course, we are aware that this 3D model only represents a snapshot in time. This is certainly not a major problem in the area of tourism activities, but in the area of planning, up-to-datedness is sometimes crucial. Construction work has already taken place

tifico. Tuttavia per noi, in quanto Fabbrica della Cattedrale, è essenziale poter disporre di una base dati che permetta di pianificare e di supportare al meglio progetti di ampio respiro. Teoricamente sarebbe ancora possibile, in realtà, lavorare con le planimetrie esistenti; sorge dunque la domanda su quale valore aggiunto offra un modello 3D rispetto a tali elaborati e alla metodologia convenzionale. Non possiamo certo limitarci al fatto che ora abbiamo un modello "bello", presentabile e, in alcuni punti, si potrebbe dire perfetto, ma dobbiamo considerare cosa vogliamo ottenere attraverso questo modello e come esso possa essere utilizzato nel nostro lavoro.

Ci sono diversi obiettivi per la Cattedrale. In generale, si tratta di *Open Access Heritage*, di turismo e di conservazione dell'edificio. Naturalmente siamo consapevoli che questo modello 3D rappresenta solo un'istantanea della situazione attuale. Ciò non costituisce un problema nell'ambito delle attività turistiche, ma per quanto riguarda la pianificazione l'aggiornamento rappresenta a volte l'elemento cruciale. Sono già stati effettuati interventi da quando è stato creato il modello e alcuni aspetti specifici sono sicuramente cambiati. Il risanamento della muratura nella sala del coro, ad esempio, ha comportato modifiche che hanno previsto l'uso di rinforzi incrociati e la sostituzione di elementi in pietra. Sono state installate nuove luci all'interno, che cambiano significativamente la percezione dello spazio originale.

Open Access Heritage

Il modello 3D praticamente completo di cui ora disponiamo, frutto del lavoro di tre università europee, ci ha mostrato il nostro edificio con misure e caratteristiche completamente diverse. Crediamo che questo potrà offrire nuove opportunità alla formazione e alla ricerca. Modelli 3D dettagliati consentiranno a ricercatori e studenti di approfondire diversi aspetti dell'edificio, come l'architettura, le tecniche di costruzione e la storia; i contributi di Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffo, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pri-

tchard, Guglielmo Villa sulle volte carolingie lo dimostrano già in modo sconcertante². Vengono regolarmente realizzati studi sulle proporzioni e sulla individuazione degli assi e delle caratteristiche geometriche dell'edificio, vengono effettuate mappature e viene indagata la morfologia. Il modello potrebbe fornire risposte dirette a molte domande e aumentare la precisione delle analisi.

Vi sono anche questioni nel campo dell'ingegneria che potrebbero essere di particolare interesse. Ad esempio, stiamo attualmente collaborando con gli studenti per esaminare la rete di tubazioni del sistema antincendio nei tetti e stiamo anche pianificando di apportare modifiche a lungo termine, che si rifletteranno poi nel modello. Le questioni sono molteplici e spesso per noi difficili da cogliere.

Stiamo quindi pensando a una nuova presentazione pubblica del nostro sito Patrimonio dell'Umanità che, supportata da un database per la pianificazione, possa fornire a tutti l'accesso ai dati storici e ai disegni dell'edificio tramite un'interfaccia utente visiva. Stiamo in particolare utilizzando il sistema Monarch³, che vorremmo associare alla nuova scansione laser. Alla fine questo potrebbe portare a un sistema BIM basato sul modello stesso, che ci aiuterà a sistematizzare la pianificazione delle attività di restauro e di ristrutturazione a lungo termine.

Turismo

Nel settore del turismo, invece, il modello può essere considerato un'offerta aggiuntiva per la visita dell'edificio grazie al fatto che consente di visualizzare parti dell'edificio che non sono raggiungibili nella realtà. La Cattedrale, ad esempio, potrebbe anche essere presentata attraverso itinerari di realtà virtuale o tour guidati digitali. Alla luce del crescente fenomeno del sovratourismo, in particolare nei siti Patrimonio dell'Umanità, questo potrebbe addirittura rappresentare un modo per tutelare più efficacemente l'edificio. Potrebbe risultare di particolare interesse anche il collegamento del modello 3D esistente della zona di scavo archeologico nel seminterrato della Cattedrale, luogo che non potremo mai rendere accessibile.

Conservazione dell'edificio

Esaminiamo i possibili ambiti di applicazione del modello per la pianificazione, lo sviluppo e la conservazione dei monumenti. Nel settore artigianale sta diventando sempre più comune per i conciatetti, ad esempio, utilizzare modelli 3D generati tramite droni per determinare le quantità di materiale necessarie per le superfici di un tetto; si tratta già oggi di un servizio standard presente sul mercato. È proprio per tali motivi che utilizzeremo il modello: ora possiamo stimare masse, quantità e superfici con maggiore precisione per quanto concerne anche la terza dimensione.

Le parti decorative e architettoniche più importanti dell'esterno della Cattedrale sono state modellate in gesso intorno al 1900, ma purtroppo diversi di questi calchi sono stati distrutti durante un bombardamento. Tuttavia, l'idea di poter recuperare lo stampo storico ha accompagnato tutti gli architetti della Cattedrale sin da allora. In futuro, gli sforzi nell'ambito della conservazione includeranno la digitalizzazione dettagliata di questi calchi, in modo da poter ancora accedere alla forma storica anche nel caso in cui i modelli in gesso andassero perduti.

Allo stesso modo ora possiamo utilizzare il modello 3D quando si tratti di sostituire, ad esempio, fragili sezioni traforate in corrispondenza delle gallerie e delle finestre. Gli scalpellini possono prendere misure o generare un file CNC dal modello in modo che i blocchi grezzi da usare per gli elementi in pietra da sostituire possano essere lavorati da robot. Ma anche questo è già uno standard presente sul mercato.

Per noi l'utilizzabilità del modello deve quindi andare oltre lo standard. In ulteriori approfondimenti da condurre con le università coinvolte, il monitoraggio del monumento sotto tutela è la nostra massima priorità e il modello può fornire in questo ambito un supporto particolare. Lo stato di fatto documentato ci offre l'opportunità di esaminare le deformazioni dell'edificio in modo molto più dettagliato rispetto a prima. Per il futuro stiamo considerando di utilizzare il modello come base per un monitoraggio regolare e completamente automatizzato

della muratura mediante droni. Attraverso la precisa definizione del modello, un drone può localizzarsi e fornirci informazioni sulle condizioni delle giunture o delle crepe, ad esempio, o sulla formazione di nuove fessurazioni nella muratura. Anche le aree fortemente colpite dalle precipitazioni e dall'umidità potrebbero essere esaminate più da vicino. Per fare ciò, il drone dovrà sorvolare regolarmente aree che possiamo raggiungere con difficoltà anche utilizzando una piattaforma elevatrice. Confrontando il modello, che funge da immagine di riferimento, possono essere identificate le modifiche che occorrono all'edificio. La definizione della nuvola di punti consente inoltre di localizzare direttamente elementi rilevanti, cosa che non sarebbe possibile mediante un confronto unicamente fotografico.

Esiste un altro utilizzo possibile in ambito di pianificazione e sviluppo: la Fabbrica della Cattedrale svolge compiti di gestione del sito ed è quindi coinvolta nella progettazione urbana all'interno della *buffer zone* del sito del Patrimonio Mondiale come autorità pubblica; le scansioni laser 3D possono aiutare nello sviluppo urbanistico di Aachen. Architetti e urbanisti possono dunque utilizzare il modello per visualizzare come si inseriscono i nuovi progetti nei dintorni della Cattedrale come parte della Valutazione dell'Impatto sul Patrimonio. Il monitoraggio dell'ICOMOS può quindi affrontare direttamente gli aspetti rilevanti dell'edificio e dei suoi dintorni.

Prevenzione dei disastri

Il modello è utile anche nella prevenzione dei disastri. Per la prima volta il modello 3D ci ha fornito una sezione trasversale accurata di tutte le singole volte della Cattedrale. Nel consueto rilevamento tachimetrico, le linee di sezione sono ovviamente il più precise possibile, ma potrebbero non fornire un'indicazione accurata dell'andamento complessivo della superficie della volta. Il modello tridimensionale esistente è stato quindi già utilizzato ad Aachen per mettere in atto una modifica nella pianificazione da parte dei vigili del fuoco in caso di potenziale incendio nell'area della copertura della sala del coro: la sezione tra-

since the model was created and individual aspects have certainly been changed. The renovation of the masonry in the choir hall, for example, has resulted in changes through the use of crossings and stone replacement. New lighting has been installed in the interior, which significantly changes the perception of the original space.

Open Access Heritage

The almost complete 3D model of the three European universities that we now have shows us our building in completely different dimensions and characteristics. We believe that this will also open up new opportunities for education and research.

Detailed 3D models will allow researchers and students to study different aspects of the building, such as the architecture, construction techniques and history; the contributions by Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffò, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa on the Carolingian vaults already demonstrate this impressively.² Proportion studies, axis determinations and geometric features of the building are regularly analysed, mapping is carried out and the morphology examined. The model could provide direct answers to many questions here and increase the accuracy of the analyses.

There are also issues in the field of engineering that may be of particular interest. For example, we are currently working with students to examine the piping network of the sprinkler system in the roofs and are also planning to make changes to it in the long term, which will be reflected in the model. The issues are manifold and often difficult for us to grasp.

We are therefore thinking about a new public presentation of our World Heritage Site which, supported by a planning database, can give everyone access to the historical data and drawings of the building via a visual user interface. We are using the Monarch³ system for this, which we would very much like to combine with the new laser scan.

Ultimately, this could result in a BIM system based on the model, which will help us to

systematize the planning of restoration and renovation measures in the long term.

Tourism

In the tourism sector, for example, it is conceivable that we could see the model as an additional offer for visiting the building and thus make areas of the building accessible that are not accessible in reality. This could be presented in virtual reality tours or digitally guided tours, for example. Against the backdrop of the increasing phenomenon of over tourism, particularly in the area of World Heritage sites, this may even be a way of protecting the substance of the building more effectively. The linking of an existing 3D model of the archaeological excavation zone in the basement of the Cathedral, which we will never be able to make accessible, could be of particular interest.

Building conservation

Let's take a look at possible fields of application of the model for planning, development and monument preservation.

In the craft sector, it is becoming more and more possible for roofers, for example, to use 3D models generated by drones to determine quantities for roof surfaces. This is already a standard service on the market. This is exactly what we will use the model for: we can now estimate masses, quantities and areas more accurately in the depth dimension.

The most important ornamental and architectural parts of the exterior of Aachen Cathedral were cast in plaster around 1900, but unfortunately several of these casts were destroyed in a bombing raid. Nevertheless, the idea of being able to fall back on the historical mold of this period was one that has accompanied all cathedral architects since that time. In future, the conservation effort will include digitizing these casts in detail so that we still have access to the historical form even if the plaster models are lost.

We can now use the 3D model in a similar way when it comes to replacing fragile tracery sections on the galleries and windows, for example. The stonemasons can take

sversale di una delle volte che hanno subito riparazioni dopo la Seconda Guerra Mondiale si è dimostrata infatti significativamente più sottile di quanto suggerissero i disegni precedenti. In caso di incendio, in questo punto non si devono utilizzare grandi quantità di acqua per lo spegnimento poiché la volta potrebbe essere danneggiata più rapidamente dal peso dell'acqua di quanto si pensasse in precedenza.

Se dovesse verificarsi un grave danno, il modello ci potrebbe fornire anche una base affidabile per una ricostruzione dettagliata della condizione precedente, cosa che lo rende particolarmente prezioso e parte della nostra preparazione alle calamità.

Prossimi passi

Oltre al potenziale già descritto, abbiamo scoperto che ci sono effettivamente alcune lacune nel nostro catalogo di oltre 6.000 disegni esistenti dell'edificio e dei complessi adiacenti, che potrebbero essere colmate grazie a questo modello. Nei prossimi anni intendiamo utilizzare queste aree del modello per creare ulteriori elaborati bidimensionali che, ancora oggi, rappresentano la forma di comunicazione prevalente nel settore delle costruzioni. Nel lungo periodo, tuttavia, è possibile prevedere di riuscire a migliorare anche questo aspetto, utilizzando il nostro sistema Monarch con un modello 3D integrato e opzioni di accesso. Ad esempio abbiamo attualmente necessità di un progetto per annullare le barriere architettoniche nel percorso di accesso dall'ingresso principale. In questo studio intendiamo utilizzare il modello per le prime visualizzazioni. Per il consolidamento strutturale del soffitto del seminterrato del locale caldaie – situato all'esterno dell'edificio – mettiamo a disposizione dell'ufficio di ingegneria il modello affinché possano lavorare anche loro su una base dati all'avanguardia. Questo è forse uno dei maggiori vantaggi: il modello può essere condiviso e ampliato.

Ringraziamenti

La Fabbrica della Cattedrale di Aachen ha ricevuto un grande dono sotto forma di un esteso modello 3D, che ci aiuterà nel no-

stro lavoro. Siamo particolarmente lieti che sia stato avviato un progetto europeo con l'Università RWTH di Aachen, la Robert Gordon University e La Sapienza Università di Roma, passo che ben corrisponde alla visione che abbiamo di noi stessi come luogo di scambio internazionale. La professionalità con cui viene condotta questa collaborazione è eccezionale. Vogliamo quindi ringraziare tutti i partecipanti.

Traduzione dall'inglese della Redazione

1. Il primo incendio di grande entità è avvenuto nel XII secolo, ma non si può dire nulla relativamente alla Cattedrale; l'1 agosto 1225 gli edifici dell'attuale Cattedrale e della Collegiata subirono gravi danni. Il 2 maggio 1656 la Cattedrale è stata ancora una volta vittima delle fiamme, come il 90% della città. Non vi sono molte immagini dell'epoca precedente l'incendio.

2. Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffò, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa. The vaulting system of the Palatine Chapel: the Aachen Cathedral World Heritage Site documentation project. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 48, 2023, pp. 119-128.

3. <<https://openmonarch.org/>>.

measurements or generate a CNC file from the model so that the raw blocks for the replacement stone can be prepared by robots. But even this is already standard on the market.

For us, the usability of the model must therefore go beyond this. In further considerations with the universities, the monitoring of the protected monument is our top priority and the model can provide particular assistance in this area. The documented status gives us the opportunity to examine deformations in the building in much more detail than before. In future, we are considering using the model as the basis for regular, fully automated drone monitoring of the masonry. By precisely defining the model, a drone can locate itself and provide us with information on the condition of joints or cracks, for example, or on the formation of new cracks in the masonry. Areas heavily affected by precipitation and moisture could also be examined more closely. To do this, the drone would have to regularly fly over areas that we can only reach under difficult conditions, even when using an elevating work platform. In comparison with the model, which serves as a kind of reference image, changes to the building can be identified. The points cloud definition also makes it possible to directly locate conspicuous elements, which would not be possible with a purely photographic comparison.

There is another use in planning and development: the Cathedral Workshop performs site management tasks and is therefore involved in inner-city planning within the buffer zone of the World Heritage Site as a public authority. 3D laser scans can help with the urban planning development of Aachen. Architects and urban planners can use the model to visualize how the new planning fits into the Cathedral's surroundings as part of the Heritage Impact Assessment. ICOMOS monitoring can then be used to directly address the relevant aspects of the building and its surroundings.

Disaster prevention

The model is also helpful in disaster prevention. For the first time, the 3D model

provided us with an accurate cross-section of all the individual vaults of the Cathedral. In the usual tachymetric survey, the section lines are of course often as accurate as possible, but they may not provide a perfect indication of the overall course of the vault surface. The existing model has therefore already been used in Aachen to implement a change in the fire department's planning for a potential fire in the roof area of the choir hall: one of the vaults repaired after the Second World War is significantly thinner in cross-section than earlier drawings had suggested. In the event of a fire, massive amounts of extinguishing water must not be used here, as the vault could be damaged more quickly by the water pressure than previously assumed. Should a major incident of damage actually occur, the model also provides us with a perfect basis for a detailed reconstruction of the previous condition, making it particularly valuable and itself part of our disaster preparedness.

Next steps

In addition to the potential already described, we have discovered that there are actually some gaps in our inventory of over 6,000 existing drawings of the building and the adjoining complexes, which could also be closed with this model. Over the next few years, we want to use these areas from the model to create two-dimensional plans here too. The latter are currently still the desired form of communication in the official building sector. It is conceivable that we will be able to improve this in the long term using our Monarch system with integrated 3D model and access options. For example, we have a planning requirement for the redesign of barrier-free access in the main entrance area. Here we want to use the model for visualizations for the first time. For the structural strengthening of the basement ceiling of our heating cellar – located outside the building – we are making the model available to the planning engineering office so that they can work on a state-of-the-art basis there too. This is perhaps one of the biggest advantages: the model can be connected and added to.

Acknowledgments

The Aachener Dombauhütte has been given a great gift in the form of the extensive 3D model, which will support us in our work. We are particularly pleased that a European project has been initiated with RWTH Aachen University, Robert Gordon University and Sapienza Università di Roma, which corresponds to our self-image as a place of international exchange. The professionalism with which this cooperation is carried out is outstanding. We would therefore like to thank everyone involved.

English text by the author

1. The first known major fire was in the 12th century, but it is not possible to make a statement about the Cathedral; on August 1, 1225, the buildings of the present Cathedral and the collegiate buildings were severely damaged. On May 2, 1656, the Cathedral was once again a victim of the flames, as was 90 percent of the city. There are not many images from the time before the fire.

2. Martina Atteni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffò, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa. The vaulting system of the Palatine Chapel: the Aachen Cathedral World Heritage Site documentation project. ISPRS International Journal of Geo-Information, 48, 2023, pp. 119-128.

3. <<https://openmonarch.org/>>.



Yannick Ley

L'evoluzione della Cattedrale di Aachen in sedici immagini *The evolution of Aachen Cathedral in sixteen figures*

<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-03.pdf>

Aachen Cathedral represents 1,200 years of architectural evolution, showcasing diverse styles and epochs. This overview examines its development through sixteen depictions that reveal construction phases and historical interpretations. The analysis begins with Charlemagne's Palatine complex and traces changes, including Gothic, Baroque, and modern adaptations. Interior transformations, such as Baroque ornamentation and early 20th-century mosaics, highlight shifts in aesthetics and preservation efforts. By exploring these depictions, they offer insights into the cathedral's architectural legacy and its historic significance.

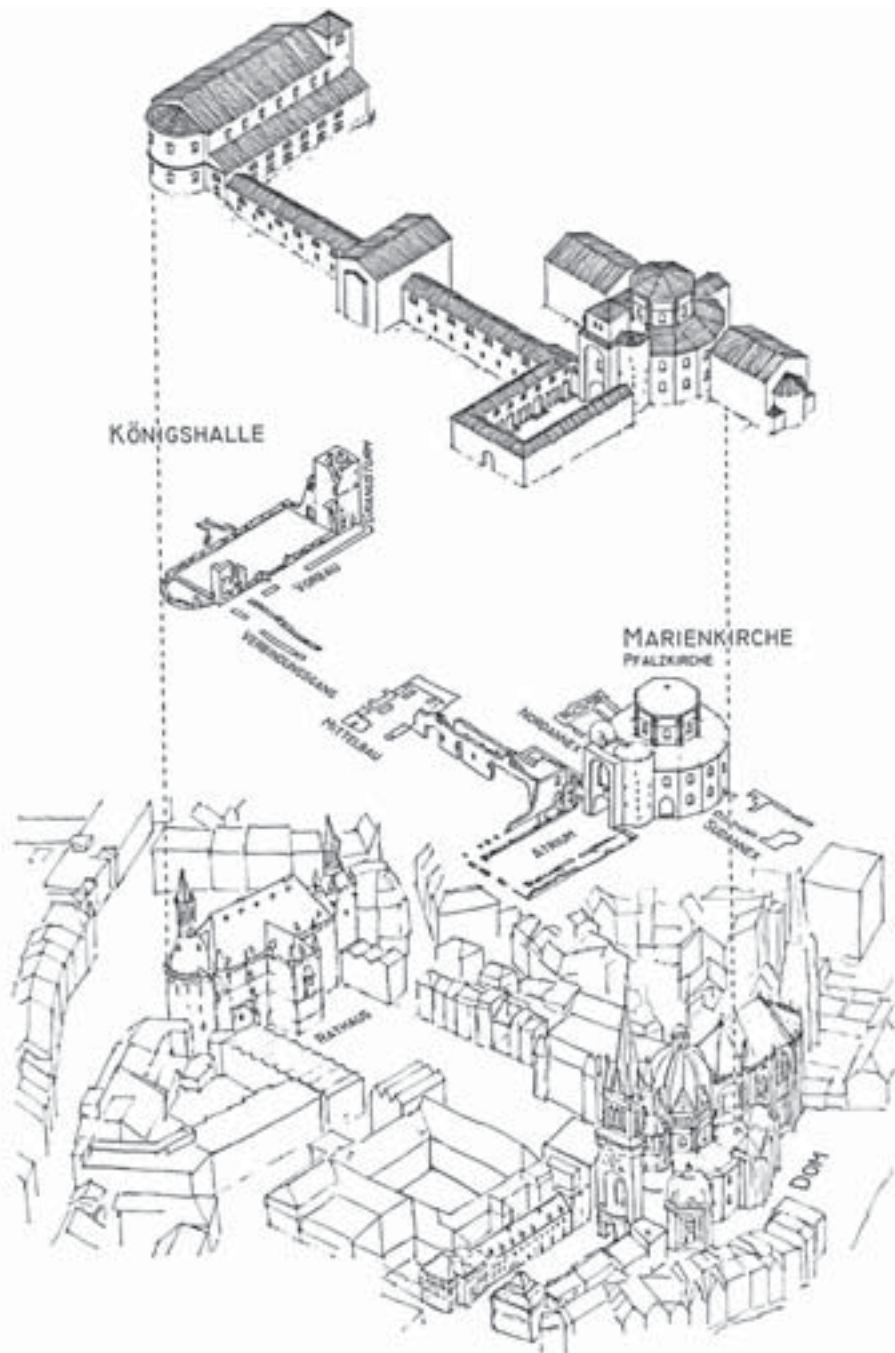
Keywords: Aachen Cathedral, UNESCO World Heritage Site, architectural transformation, various architectural styles, historical depictions, drawings and photographs.

Aachen Cathedral, with its 1,200-year architectural legacy and diverse architectural elements, serves as an outstanding UNESCO World Heritage Site in European architectural history, providing a unique record of various construction epochs and architectural styles. Beyond examining the present structure, successive phases of its construction history can be illustrated by analyzing select depictions, some of which portray the building with historically accurate, others with proposed but eventually unimplemented features. The following collection of figures presents Aachen Cathedral in various contexts, offering an overview of its architectural development and its visual reception over the centuries.

The foundation of the Cathedral complex was laid by Charlemagne, who, in the late 8th century, commissioned the Palatine complex, consisting of the palace Aula Regia to the north, the Palatine Chapel to the south, and a connecting corridor in between the two buildings [Pieper, Schindler 2017, pp. 31, 32]. Figure 1 highlights preserved fragments of these original structures within the present-day architectural ensemble. This detailed line drawing, designed by architectural historian Judith Ley and illustrated by Frédéric Schnee, represents the historical core of the city. The illustration's lower portion depicts modern-day Aachen around the historic town hall and Cathedral, while the middle section showcases fragments of the original structure, including

La Cattedrale di Aachen testimonia, con i suoi 1.200 anni di evoluzione architettonica, stili ed epoche diverse. La panoramica di immagini ne esamina lo sviluppo attraverso raffigurazioni che ne rivelano le fasi costruttive e le diverse interpretazioni storiche. Iniziando dal complesso palatino carolingio, si illustrano i vari cambiamenti, dal gotico, al barocco, agli adattamenti moderni. Le trasformazioni interne, come l'ornato barocco e i mosaici del primo Novecento, evidenziano i cambiamenti nell'estetica e negli interventi di conservazione. Attraverso l'esame di questa serie di immagini ci viene offerto uno sguardo sul patrimonio architettonico della Cattedrale e sulla sua importanza storica.

Parole chiave: Cattedrale di Aachen, patrimonio mondiale dell'UNESCO, trasformazione architettonica, stili architettonici, rappresentazioni storiche, disegni e fotografie.



1/ *Pagina precedente*. IX e XXI secolo. Il complesso palatino carolingio e i suoi resti nell'attuale Cattedrale di Aachen e Aula Regia. Disegno di Frédéric Schnee (© Judith Ley).
Previous page. 9th and 21st century. *The Carolingian Palatine complex and its remains in the present Aachen Cathedral and Major Hall*. Drawing by Frédéric Schnee (© Judith Ley).

2/ 1215. Rilievo con la dedicazione del santuario di Carlo Magno (foto di Ann Münchow, 1981; © Aachen Cathedral Treasury).

1215. *Dedication relief of the Charlemagne shrine* (photo by Ann Münchow, 1981; © Aachen Cathedral Treasury).

La Cattedrale di Aachen, con i suoi 1.200 anni di storia e con le sue diverse componenti architettoniche, rappresenta un eccezionale sito del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO nella storia dell'architettura europea, e offre una testimonianza unica di epoche costruttive e stili architettonici diversi. Le varie fasi della storia edilizia della Cattedrale possono essere illustrate attraverso una disamina della struttura attuale ma anche analizzando una selezione di immagini, alcune delle quali ritraggono dettagli storicamente corretti e altre mostrano elementi che erano stati progettati ma che non sono stati realizzati. La raccolta di immagini qui presentate mostra la Cattedrale di Aachen in vari contesti, offrendo una panoramica sul suo sviluppo architettonico e sulla ricostruzione della sua immagine attraverso i secoli.

La fondazione del complesso della Cattedrale è ascrivibile a Carlo Magno, che alla fine dell'VIII secolo commissionò il complesso palatino costituito dall'Aula Regia del palazzo a nord, dalla Cappella Palatina a sud, e da un corridoio di collegamento tra i due edifici [Pieper, Schindler 2017, pp. 31, 32].

La figura 1 mostra i resti delle strutture originarie all'interno del complesso architettonico attuale. L'accurato disegno al tratto, basato sulla ricostruzione del complesso della storica dell'architettura Judith Ley e realizzato da Frédéric Schnee, mostra il nucleo storico della città. Nella parte inferiore è raffigurata la moderna Aachen intorno al Municipio storico e alla Cattedrale, nella parte centrale i resti della struttura originaria, tra i quali spicca la Cappella Palatina con la sua forma ottagonale completamente conservata e le fondazioni dell'Aula Regia. Questi elementi architettonici, che consentono la ricostruzione del complesso carolingio e una visualizzazione esplicativa dello stato attuale e delle fasi storiche, appaiono esplosi verso la parte alta dell'elaborato.

La prima rappresentazione nota della Cattedrale di Aachen è quella nel rilievo con l'offerta del santuario alla Vergine presente sul reliquiario di Carlo Magno, sicuramente realizzato prima del 1215 (fig. 2). Carlo Magno è inginocchiato di fronte alla Vergine con il Bambino e le sta offrendo una miniatura dell'edificio. Sono qui raffigurati l'ottagono,

the complete octagonal Palatine Chapel and the Aula Regia's foundations. These elements converge in the upper portion, reconstructing the Carolingian complex and offering an educational visualization of its historical and present states. The earliest known depiction of Aachen Cathedral appears on the Dedication relief on the shrine of Charlemagne, completed in 1215 (fig. 2). Here, the dedication of the Cathedral to Mary is depicted with Charlemagne kneeling before Mary with Child, offering the building in miniature. This portrayal includes the Octagon, the western bell tower, the gallery connecting the two, and the eastern choir extension.

Albrecht Dürer's north elevation from 1520 (fig. 3) shows the Cathedral about 300 years later, highlighting the Gothic Choir, the Gothic dome atop the Octagon, and other Gothic elements, including the bell tower. The Chapel of Saint Hubert and Charlemagne, constructed in 1455, is visible in front of the intersection of the Gothic Choir and the Octagon [Hugot 1988, p. 48]. Also discernible is the Chapel of Saint Nicholas, built between 1473 and 1485 [Konnegen 2015]. Dürer's depiction underscores the dense medieval urban fabric surrounding the Cathedral, sharply contrasting with later urban developments.

Wilhelm Altmann's copper engraving from 1664 (fig. 4) depicts an unimplemented bell tower design and changes to the Octagon's dome. It also shows the Chapel of Saint Anne's open arcade level, serving as a vendor area and an entryway to the Cathedral. This image notably portrays the Gothic Hungarian Chapel prior to its destruction in a fire in the city of Aachen. A later engraving from around 1845 (fig. 5) by August Heinrich depicts the bell tower at a reduced height and the new Baroque Hungarian Chapel, completed in 1756 [Siebigs 2000]. The Chapel of Saint Anne arcade is now enclosed, with additional vendor stalls surrounding the Cathedral. This aspect is further illustrated in an engraving from the 19th century (fig. 6), evidencing substantial commercial activity around the church and the construction of two-story buildings adjacent to the Gothic Choir.

A photograph from around 1865 (fig. 7) reveals the truncated height of the bell tower, giving insight into the surrounding buildings



3/ *A sinistra, in alto.* 1520. Prospetto nord della gotica Cattedrale di Aachen e il Katschhof con edifici medievali, disegno di Albrecht Dürer (linoprint: AL, 1937).

Top, left. 1520. *North elevation of gothic Aachen Cathedral and Katschhof with medieval buildings, drawing by Albrecht Dürer (linoprint: AL, 1937).*

4/ *A sinistra, in basso.* 1664. Prospetto sud della Cattedrale di Aachen con il piano terra aperto della Cappella di sant'Anna e un progetto non realizzato della torre. Calcografia di Wilhelm Altzenbach (© Aachen Cathedral Treasury).

Bottom, left. 1664. *South elevation of Aachen Cathedral with open ground floor of Chapel of Saint Anne and an unimplemented design of the tower. Copperplate engraving by Wilhelm Altzenbach (© Aachen Cathedral Treasury).*

5/ *A destra, in alto.* 1845. Prospetto sud della Cattedrale di Aachen con la Cappella ungherese, il piano terra chiuso della Cappella di sant'Anna e la torre campanaria bassa. Incisione su acciaio di August Heinrichs (© Aachen Cathedral Treasury).

Anne and the lower bell tower. Steel engraving by August Heinrichs (© Aachen Cathedral Treasury).

6/ *A destra, al centro.* XIX secolo. Prospetto sud della Cattedrale di Aachen con botteghe e abitazioni integrate. Incisione di anonimo (© Aachen Cathedral Treasury).

7/ *A destra, in basso.* Circa 1865. Fotografia del lato nord della Cattedrale di Aachen con la torre campanaria bassa



e la Katschhof con la Fabbrica della Cattedrale e gli edifici meridionali (© Aachen Cathedral Treasury).
Bottom, right. *Around 1865. North photograph of Aachen Cathedral with lower bell tower and Katschhof with Cathedral Workshop and southern buildings* (© Aachen Cathedral Treasury).

8/ Circa 1880. Fotografia del lato nord della Cattedrale di Aachen con la torre campanaria bassa e la Katschhof in costruzione (Theodor Creifelds; © Aachen Cathedral Treasury).

Around 1880. Northern aspect of Aachen Cathedral with bell tower and Katschhof under construction (Theodor Creifelds; © Aachen Cathedral Treasury).

9/ 20th century. Fotografia del lato nord con l'attuale torre campanaria e la Katschhof senza la Fabbrica della Cattedrale e gli edifici meridionali (© Aachen Cathedral Treasury).

20th century. Northern aspect with present-day bell tower and Katschhof with removed Cathedral Workshop and southern buildings (© Aachen Cathedral Treasury).

la torre campanaria a ovest, la galleria di collegamento e l'ampliamento del coro a est. La veduta del prospetto nord di Albrecht Dürer, del 1520 (fig. 3), mostra la cattedrale circa trecento anni dopo, con il Coro gotico, la cupola gotica sopra l'ottagono e altri elementi gotici, inclusa la torre campanaria. Nel punto in cui il Coro gotico si raccorda all'ottagono è visibile anche la Cappella di sant'Uberto e Carlo Magno, costruita nel 1455 [Hugot 1988, p. 48]. Si riconosce inoltre la Cappella di san Nicola, costruita tra il 1473 e il 1485 [Konnegen 2015]. La rappresentazione di Dürer evidenzia la fitta struttura urbana medievale a ridosso della Cattedrale, in netto contrasto con il successivo sviluppo urbano.

L'incisione su rame di Wilhelm Altzenbach del 1664 (fig. 4) presenta un progetto per la torre campanaria non realizzato e modifiche alla cupola dell'ottagono. Inoltre mostra il piano terra della Cappella di sant'Anna ad arcate aperte, utilizzato come spazio commerciale e come ingresso alla Cattedrale. È qui raffigurata anche la Cappella ungherese gotica prima della sua distruzione, dovuta a un incendio sviluppatosi nella città di Aachen.

Un'incisione successiva, del 1845 circa, opera di August Heinrichs (fig. 5) mostra la torre campanaria con un'altezza ridotta e la nuova Cappella ungherese barocca, completata nel 1756 [Siebig 2000]. L'arco di ingresso alla Cappella di sant'Anna è ora chiuso e i chioschi per il commercio si trovano all'esterno, intorno alla Cattedrale.

Un'incisione del XIX secolo (fig. 6) rappresenta le attività commerciali che si svolgevano intorno alla chiesa e la costruzione di edifici a due piani adiacenti al Coro gotico.

Una fotografia del 1865 circa (fig. 7) mostra la torre campanaria con un'altezza ridotta e offre una panoramica sugli edifici circostanti e sulla Fabbrica della Cattedrale sul Katschhof. Quindici anni dopo, una fotografia di Theodor Creifelds (fig. 8) documenta la costruzione della torre campanaria e mostra come la maggior parte degli edifici sul Katschhof sia stata rimossa. Una fotografia del XX secolo (fig. 9) presenta la torre campanaria completata e il Katschhof aperto, simile a quello attuale.

Anche l'interno della Cattedrale ha subito importanti trasformazioni nel corso dei secoli, documentate da una serie di immagini.

and the temporary Cathedral workshop on the Katschhof. Fifteen years later, a photograph by Theodor Creifelds (fig. 8) documents the



10/ 1573. Veduta interna dell'ottagono verso est con gli interni del XVI secolo. Disegno originale di Hendrik von Steenwyck, 1573; copia a colori di Susanna von Steenwijk, 1615 circa (foto di Anne Gold, 2019; © Aachen Cathedral Treasury).

1573. Interior view of the Octagon towards east with interior of the 16th-century. Original drawing by Hendrik von Steenwyck, 1573; colored copy by Susanna von Steenwijk, around 1615 (photo by Anne Gold, 2019; © Aachen Cathedral Treasury).

11/ 1737. Veduta interna dell'ottagono verso est con gli interni barocchi e le colonne rimosse.

Disegno di H. Satler (© Aachen Cathedral Treasury).
1737. Interior view of the Octagon view towards east with Baroque interior and removed columns. Drawing by H. Satler (© Aachen Cathedral Treasury).

bell tower construction, with most buildings on the Katschhof being can be deleted. A final 20th-century photograph (fig. 9) shows the completed bell tower and the Katschhof, now opened-up, resembling its modern-day appearance.

The Cathedral's interior underwent significant changes over the centuries, evidenced in various depictions. A painting by Hendrik van Steenwyck from 1573 offers a view of the late medieval interior (fig. 10), capturing its dimly lit, minimally decorated state, where the large windows of the Gothic Choir draw the viewer's gaze eastward. In the Baroque era, the interior was updated to reflect contemporary aesthetics, enhancing symbolic elements tied to veneration of Charlemagne and pilgrimage.

An illustration of the Octagon's interior by H. Satler from 1737 (fig. 11) shows Baroque decorations and the absence of the ancient columns, which were removed by the French during the secularization and later transferred to the Royal Palace in Paris [Konnegen 2016, p. 39]. A painting by Nicolas-Marie-Joseph Chapuy from 1840 (fig. 12) shows the reinstated columns, returned to Aachen after the Treaty of Paris of 1815 [Faymonville 1916, p. 69]. Shortly after, the Baroque decorations were completely removed, and the interior was brought back to its original undecorated state which drew the focus more towards the architectural elements.

Another major interior transformation took place at the beginning of the 20th century, when the Carolingian surfaces were adorned with mosaics. Photographs from 1903 (fig. 13) and 1911 (fig. 14) depict the Octagon and Hexadecagon without mosaics, showing the interior in a similar state as portrayed in the painting of Steenwyck of 1573. An interior photograph of the year 1912 (fig. 15) shows the finished mosaic on the Hexadecagon, that is preserved to this day and creates the highly decorated interior of Aachen Cathedral, while the original state of the walls is only visible on one single pillar in the northwest.

The set of the images ends with figure 16, which shows the current state of the interior and exterior of Aachen Cathedral.

English text by the author



12/ 1840. Veduta interna dell'ottagono attraverso l'esadecagone verso est con gli interni barocchi e le colonne ripristinate. Disegno di Nicolas-Marie-Joseph Chapuy, 1840; litografia di Isidore Laurent Deroy, 1845 circa (© Aachen Cathedral Treasury).

1840. Interior view of the Octagon through the Hexadecagon towards east with Baroque interior and reinstalled columns. Drawing by Nicolas-Marie-Joseph Chapuy, 1840; lithography by Isidore Laurent Deroy, around 1845; © Aachen Cathedral Treasury).

13/ 1903. Fotografia dell'interno dell'ottagono verso est senza i mosaici (Adolf Busch; © Aachen Cathedral Treasury).

1903. Interior photograph of the Octagon towards east without mosaic (Adolf Busch; © Aachen Cathedral Treasury).

14/ 1911. Fotografia dell'interno dell'esadecagone senza i mosaici (© Aachen Cathedral Treasury).
1911. Interior photograph of the Hexadecagon without mosaic (© Aachen Cathedral Treasury).

15/ 1912. Fotografia dell'interno dell'esadecagone con i mosaici (© Aachen Cathedral Treasury).
1912. Interior photograph of the Hexadecagon with mosaic (© Aachen Cathedral Treasury).



16/ Lo stato attuale della Cattedrale di Aachen. In alto a sinistra: veduta dell'ottagono; in basso a sinistra: un dettaglio dell'esadecagono; in alto a destra: vista nord; in basso a destra: vista ovest (foto di Yannick Ley).

The current state of Aachen Cathedral. Top left: an insight into the current octagon; bottom left: a detail of the hexadecagon; top right: the northern view; bottom right: the western view.



Un dipinto di Hendrik van Steenwyck del 1573 offre una visione dell'interno tardo medievale (fig. 10) e ne rivela la scarsa illuminazione e la ridotta decorazione, mentre le grandi finestre del Coro gotico catturano lo sguardo rivolgendolo verso est. In epoca barocca l'interno fu rinnovato in linea con il gusto del tempo, valorizzando elementi simbolici legati alla venerazione di Carlo Magno e al pellegrinaggio.

Un'illustrazione dell'interno dell'ottagono di H. Satler, del 1737 (fig. 11), mostra le decorazioni barocche e l'assenza delle antiche colonne che furono rimosse dai francesi durante la secolarizzazione e in seguito trasferite

al Palazzo Reale di Parigi [Konnegen 2016, p. 39]. Un dipinto di Nicolas-Marie-Joseph Chapuy del 1840 (fig. 12) rappresenta le colonne ricollocate al proprio posto, restituite ad Aachen dopo il secondo trattato di Parigi del 1815 [Faymonville 1916, p. 69]. Poco dopo, le decorazioni barocche furono completamente rimosse e l'interno fu riportato al suo stato originario privo di decorazioni, cosa che conferisce maggior risalto agli elementi architettonici.

Un'altra grande trasformazione dell'interno avvenne all'inizio del XX secolo, quando le superfici carolingie furono adornate con mosaici. Fotografie del 1903 (fig. 13) e del

1911 (fig. 14) presentano l'ottagono e l'esadecagono senza decorazioni musive, rivelando l'interno in uno stato simile a quello che compare nel dipinto di Steenwyck del 1573.

Una fotografia dell'interno del 1912 (fig. 15) mostra i mosaici dell'esadecagono che si conservano ancora oggi e creano un ambiente interno finemente decorato; lo stato originario delle pareti è visibile solo su un singolo pilastro a nord-ovest.

Chiude la serie delle immagini la figura 16, che mostra lo stato attuale dell'interno e dell'esterno della Cattedrale.

Traduzione dall'inglese della Redazione

References

- Faymonville 1916 = Karl Faymonville. Die Kunstdenkmäler der Stadt Aachen. In *Die Kunstdenkmäler der Rheinprovinz*. Band 10, I. Das Münster zu Aachen. Düsseldorf, L. Schwann, 1916.
- Hugot 1988 = Leo Hugot. *Der Dom zu Aachen*. Aachen: einhard verlag, 1988. ISBN: 9783920284569.
- Konnegen 2015 = Lydia Konnegen. *Sanierung Nikolauskapelle - Dachstuhl und Außenwandflächen: Ein historischer Überblick* (= Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauvereins. Band 17). Aachen: Thouet, 2015.
- Konnegen 2016 = Lydia Konnegen. Die antiken Säulen des Aachener Domes und ihr Schicksal in der Französischen Zeit. In Karlsverein-Dombauverein (ed.). *Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauvereins*. Band 18: Der Aachener Dom in Französischer Zeit 1794 bis 1815. Aachen: Thouet, 2016, pp. 34-47.
- Pieper, Schindler 2017 = Jan Pieper, Bruno Schindler. *Thron und Altar, Oktogon und Sechzehneck. Die Herrschaftsikonographie der karolingischen Pfalzkapelle zu Aachen*. Berlin: Geymüller Verlag für Architektur, 2017. ISBN: 9783943164381.
- Siebigs 2000 = Hans-Karl Siebigs. *Die Ungarnkapelle am Dom zu Aachen. Bauliche Sanierungsmaßnahmen an der Ungarnkapelle des Domes zu Aachen in den Jahren 1991-1994* (= Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauvereins. Band 3). Aachen: Thouet, 2000.



Douglas Pritchard

La documentazione della Cattedrale di Aachen: approcci integrati per la conservazione digitale utilizzando *Terrestrial Laser Scanning* e fotogrammetria

The documentation of Aachen Cathedral: integrated approaches for digital preservation using Terrestrial Laser Scanning and photogrammetry

<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-04.pdf>

The digital documentation of Aachen Cathedral, a UNESCO World Heritage site of extraordinary historical significance, was achieved through the integration of advanced techniques (terrestrial laser scanning, terrestrial photogrammetry, and UAV-based photogrammetry). This approach enabled the creation of 3D models accurately representing the site's morphological and architectural characteristics. The workflow, developed over multiple campaigns, facilitated the collection of both exterior and interior data, their registration, and a complex post-production phase using advanced tools for data segmentation and optimization. Despite challenges related to managing large datasets and limited software interoperability, the results highlight the ability of modern technologies to provide powerful tools for digital preservation. The high precision and versatility of the research outputs make them indispensable for future interdisciplinary studies, relevant both to documentation and site management.

Keyword: Cultural Heritage, digital documentation, 3D models, conservation, data interoperability.

Information technologies and digital recording tools are becoming increasingly essential for monitoring, risk management, cultural education, maintenance facilitation, conservation development, and other activities at cultural heritage sites. This paper focuses on the practical planning and execution of the 3D recording project at the Aachen Cathedral World Heritage Site during 2023-2024. The multi-institutional recording project aimed to comprehensively document the building and the surrounding UNESCO precinct by employing various advanced recording technologies (fig. 1). The project aimed to create a highly detailed and comprehensive 2D and 3D dataset that would serve immediate requirements such as dimensional analysis, conservation planning, and public engagement while ensuring a high accuracy level to accommodate future unanticipated applications [Oliveira et al. 2014]. The Aachen Cathedral building and site are appropriate for this digital heritage research project. The unique structure spans various construction eras, such as Carolingian, Romanesque, Gothic, Baroque, and 19th-century, resulting in complex structural geometry, ornaments and surface textures.

La documentazione digitale della Cattedrale di Aachen, sito UNESCO di straordinaria rilevanza storica, è stata realizzata attraverso l'integrazione di tecniche avanzate (scansione laser terrestre, fotogrammetria terrestre e con UAV). L'approccio adottato ha permesso di creare modelli 3D rappresentativi delle caratteristiche morfologiche e architettoniche del sito. Il workflow, articolato in più campagne, ha consentito la raccolta di dati dell'esterno e dell'interno della Cattedrale, la loro registrazione e una complessa fase di post-produzione, con strumenti avanzati per la segmentazione e ottimizzazione dei dati. Nonostante le sfide legate alla gestione di dataset di grandi dimensioni e alla limitata interoperabilità tra software, i risultati evidenziano la capacità delle moderne tecnologie di fornire strumenti potenti per la conservazione digitale. L'alta precisione e versatilità dei prodotti della ricerca li rendono necessari per studi futuri e interdisciplinari, connessi tanto alla documentazione quanto alla gestione del sito.

Parole chiave: Patrimonio Culturale, documentazione digitale, modelli 3D, conservazione, interoperabilità dei dati.

Le tecnologie informatiche e gli strumenti di registrazione digitale stanno diventando sempre più essenziali per il monitoraggio, la gestione dei rischi, la divulgazione culturale, la facilitazione della manutenzione, la programmazione di interventi di conservazione e altre attività nei siti del patrimonio culturale. Il presente contributo si focalizza sulla progettazione e realizzazione dell'acquisizione 3D della Cattedrale di Aachen, sito Patrimonio dell'Umanità, durante il biennio 2023-2024. Il progetto di acquisizione, condotto da più istituzioni, mirava a documentare in modo completo l'edificio e l'area circostante, appartenente al patrimonio UNESCO, utilizzando diverse tecnologie di rilevamento avanzato (fig. 1). L'obiettivo era quello di creare un dataset 2D e 3D estremamente dettagliato e completo che rispondesse a esigenze immediate, come l'analisi dimensionale, la programmazione degli interventi di conservazione e il coinvolgimento del pubblico, garantendo al contempo un livello di precisione elevato per applicazioni future [Oliveira et al. 2014].

La Cattedrale di Aachen e il centro storico della città rappresentano un contesto ideale per questo progetto di ricerca sul patrimonio digitale. Infatti la struttura unica della Cattedrale abbraccia diverse epoche di costruzione, tra cui quella carolingia, romanica, gotica, barocca e del XIX secolo, con una geometria strutturale complessa, decorazioni e texture superficiali articolate. La metodologia di rilievo e le varie fasi delle attività di produzione forniscono un quadro replicabile per analoghi contesti di documentazione digitale.

Il progetto è il risultato di una collaborazione tra Sapienza Università di Roma (Italia), la Robert Gordon University (Scozia) e la

RWTH Aachen University (Germania), in collaborazione con la *Dombauhütte* Aachen. Il contributo costituisce un avanzamento di due precedenti pubblicazioni focalizzate sul processo di acquisizione e sullo studio di elementi caratteristici [Pritchard et al. 2023; Attenni et al. 2023].

Questo articolo prende in esame gli aspetti inerenti le tecniche di acquisizione e i metodi di post-elaborazione dei dati utilizzati nella Cattedrale di Aachen, riconoscendo l'importanza di un processo di documentazione completo che bilanci gli aspetti di natura tecnica con analisi storiche e semantiche. Mentre la qualità e la precisione sono fondamentali in un progetto di documentazione digitale, è altrettanto importante rispettare e connettersi al contesto culturale più ampio. Per tale motivo il gruppo di ricerca ha beneficiato di una collaborazione multidisciplinare con specialisti in diversi campi, tra cui rilievo digitale 3D, architettura, modellazione 3D, storia dell'architettura e conservazione dei monumenti. Questa collaborazione ha facilitato lo scambio di conoscenze, consentendo di identificare aree di interesse dell'edificio altrimenti non adeguatamente valorizzate.

Pianificazione del progetto

Un importante requisito identificato nella pubblicazione della Commissione Europea del 2020, *Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage*, è quello di stabilire il livello di dettaglio da raggiungere, le aree da documentare e la precisione dei dati già dalle prime fasi di progettazione del rilievo. Tuttavia, come precisato nella pubblicazione, «non esiste un quadro generalmente accettato per specificare il livello di dettaglio e i requisiti di precisione per i diversi tipi di

1/ Immagine da drone del tetto della Cattedrale, vista verso ovest (foto di Douglas Pritchard).
Drone photograph of the roof of the Cathedral looking west (photo by Douglas Pritchard).

registrazione geometrica dei monumenti. Ogni monumento viene documentato geometricamente sulla base delle specifiche di precisione e costi fornite o concordate con il proprietario o lo *stakeholder*» [European Commission 2022].

Lo studio della Commissione Europea elenca quattro categorie per la pianificazione e le fasi di produzione della digitalizzazione 3D di beni immobili. La prima riguarda la pianificazione del progetto e affronta le decisioni iniziali relative alla gestione e descrizione del progetto; la seconda riguarda l'attività di acquisizione dei dati in situ e comprende tutte le osservazioni e le scelte operative necessarie per avviare l'attività in campo, compreso il metodo tecnico di acquisizione dei dati; la terza riguarda la produzione e il rilascio dei dati: si concentra sulle problematiche della post-elaborazione digitale, convenzioni di denominazione, registrazione di metadati e paradatai, e output/consegne mentre l'ultima riguarda l'archiviazione e descrive le procedure necessarie per il backup della produzione e l'archiviazione dei dati.

Il progetto di Aachen ha incorporato un approccio integrato per la raccolta dei dati, combinando *Terrestrial Laser Scanning* (TLS), fotogrammetria digitale terrestre (TDP) e fotogrammetria digitale aerea (UAVDP). Presi singolarmente, questi metodi di acquisizione possono fornire modelli 3D precisi che rappresentino anche la componente radiometrica, ma la loro integrazione permette di arrivare a ottenere modelli 3D geometricamente accurati e con texture fotorealistiche [Hassan, Fritsch 2019]. Questo approccio garantisce una copertura completa delle superfici dal punto di vista dimensionale, migliorando al contempo la qualità delle texture. Tali tecniche consolidate [Daneshmand et al. 2018; Remondino 2011] registrano con precisione la geometria delle superfici, rendendole strumenti preziosi per la conservazione digitale del patrimonio culturale costruito (figg. 2, 3).

La documentazione della Cattedrale di Aachen si basa su un presupposto fondamentale legato alla maggiore utilizzabilità di modelli virtuali derivati da nuvole di punti 3D, correttamente registrate e un'alta precisione

The recording methodology and various stages of production activities provide a replicable framework for similar digital documentation projects.

The project is a collaborative effort between the Sapienza University of Rome (Italy), Robert Gordon University (Scotland), and RWTH Aachen University (Germany), in partnership with the Dombauhütte Aachen. It builds upon two previous publications describing the development process and observations [Pritchard et al. 2023; Attenni et al. 2023].

Although this paper focuses on the recording techniques and data post-processing methods at the Aachen Cathedral, there is a recognised appreciation for a comprehensive recording process that balances technical precision with historical and semantic considerations. While quality and accuracy are fundamental in a digital documentation project, respecting and connecting the broader cultural context is equally important. For that reason, the documentation team benefited from a multidisciplinary collaboration with specialists from several fields, including 3D digital survey, architecture, 3D modelling, architectural history, and monument conservation. This collaboration facilitated the exchange of knowledge, enabling the identification of areas of the building that might not be obvious to a standard survey team.

Project planning

An important requirement identified in the 2020 European Commission publication, Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage, is to establish the level of detail, areas requiring recording, and precision at the outset of a documentation project. However, as described in the publication, "there is no generally accepted framework for specifying the level of detail and the accuracy requirements for the various kinds of geometric recording of monuments. Every monument is geometrically documented based on the accuracy and cost specifications supplied or agreed to by the owner or stakeholder" [European Commission 2022]. The European Commission study lists four categories for immovable 3D digitisation



2/ Scanner laser terrestre Z+F Imager 5016 davanti alla Cattedrale (foto di Douglas Pritchard).
The terrestrial laser scanner Z+F Imager 5016 in front of the Cathedral (photo by Douglas Pritchard).

planning and production stages. The first category, *Project planning*, addresses the early decisions on critical project management and project description requirements. The second category, *Documentation and site work*, are the observations and decisions needed at the start of the on-site work, including the technical data capture method. Production and delivery mainly address the digital processing issues, naming conventions, the recording of meta and paradata and output/deliverables. *Archive* lists the necessary production backup procedures and data archive.

The Aachen project incorporated an integrated data capture approach that combined Terrestrial Laser Scanning (TLS), Terrestrial Digital Photogrammetry (TDP), and Aerial Digital Photogrammetry (UAVDP). Individually, these data capture methods can provide precise, full-colour 3D models, but their integration enhances the creation of 3D models that are geometrically accurate and photo-realistically textured [Hassan, Fritsch 2019]. This approach provides comprehensive dimensional surface coverage while enhancing texture generation. These well-established techniques [Daneshmand et al. 2018; Remondino 2011] accurately record surface geometries, making them valuable tools for digitally preserving immovable cultural heritage (figs. 2, 3).

The recording of the Aachen Cathedral relied on the concept that virtual models derived from dense, properly registered 3D point clouds, with verifiable high geometric precision, offer greater credibility than less accurate computer-generated models. With a verifiable geometric connection to the structures they represent, these models are more valuable for future conservation, study and research. Dimensionally accurate and thoroughly captured 3D datasets of existing structures possess a timeless quality, as their accuracy preserves the essence of the physical structures they represent at that moment in time. This legitimacy extends beyond metric precision alone and reflects the tools, metadata and comprehensive rigour of the methods used to create them [Barrile et al. 2022; Pritchard et al. 2017].



geometrica verificabile rispetto a quelli nativi digitali, realizzati quindi solo a partire da processi di modellazione. Grazie alla loro connessione geometrica con le strutture che rappresentano, questi modelli giocano un ruolo di primaria importanza per la conservazione futura, lo studio e la ricerca. In quest'ottica, infatti, un dataset 3D accurato dal punto di vista dimensionale che ricalchi in maniera completa le strutture esistenti possiede una qualità senza tempo, poiché la sua struttura conserva i caratteri morfologici che l'edificio incarna in quel preciso momento storico. Questo valore si estende oltre la sola precisione metrica e riflette gli strumenti, i metadati e il rigore complessivo dei metodi utilizzati per crearli [Barrile et al. 2022; Pritchard et al. 2017].

Il progetto di Aachen è iniziato come una ricerca collaborativa tra le tre istituzioni accademiche, con il pieno supporto dell'amministrazione della Cattedrale. Sulla base dei risultati di precedenti progetti di documentazione del patrimonio culturale, delle attrezzature disponibili all'epoca, delle discussioni con il direttore della Cattedrale e degli output inizialmente desiderati, il TLS e la fotogram-

metria sono stati selezionati come principali metodi di registrazione. Questo flusso di lavoro operativo mirava a fornire il massimo livello di dettaglio 3D e la massima risoluzione delle immagini possibili [Adamopoulos, Rinaudo 2019]. Come in precedenti progetti complessi di visualizzazione del patrimonio, l'approccio adottato per il progetto della Cattedrale di Aachen segue tipicamente la struttura e la sequenza degli eventi delineati nello studio della Commissione Europea. La pubblicazione *Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage* di Historic England descrive una metodologia di pianificazione del progetto simile [Historic England 2024]. La pianificazione iniziale del progetto si è basata su disegni CAD 2D esistenti della Cattedrale per identificare le posizioni dei punti di controllo del rilievo topografico. I disegni hanno inoltre aiutato a determinare le posizioni degli scanner, garantendo una sufficiente sovrapposizione tra le scansioni. I disegni annotati sono stati poi utilizzati per stimare i tempi di lavoro sul posto, evidenziare eventuali problemi di salute e sicurezza e facilitare la comunicazione con la direzione della Cattedrale.

3/ Scanner laser terrestre Z+F Imager 5010C
sul parapetto del balcone del lato est della Cattedrale
(foto di Douglas Pritchard).
*The terrestrial laser scanner Z+F Imager 5010C on the east
parapet of the Cathedral (photo by Douglas Pritchard).*



Le aree di documentazione includevano l'intero perimetro esterno, comprendendo le strade circostanti, i camminamenti posti a quota superiore e i livelli delle terrazze; l'interno con i principali ambienti tra cui il *Westwork* (facciata occidentale), la sala d'ingresso, la sala del Coro gotico, l'ottagono carolingio (Cappella Palatina), il deambulatorio, la galleria superiore, la Cappella di san Nicola, la Cappella di Carlo, la Cappella di san Mattia, la Cappella di sant'Anna e la Cappella ungherese e, infine, diversi spazi aggiuntivi tra cui la torre campanaria e i diversi piani interstiziali tra le volte gotiche e la copertura (figg. 4, 5, 6).

Rete di controllo del sito

Un precedente rilievo topografico dell'esterno della Cattedrale ha permesso l'identificazione di capisaldi topografici permanenti che circondano l'edificio. Questi punti di controllo sono stati integrati nel dataset principale della nuvola di punti per garantire una georeferenziazione e un allineamento accurato dei dati acquisiti. La distanza tra le stazioni era inferiore ai 100 m, e tutte le posizioni TLS sono state registrate sulla rete di controllo del sito. Nella scelta della posizione degli scanner il

progetto di rilievo ha considerato diversi fattori, tra cui la necessità di acquisire integralmente la forma architettonica complessiva e le elaborate superfici esterne e interne. Il gruppo di lavoro ha attentamente valutato elementi come il raggio d'azione ideale del laser, la risoluzione dei dati, le aree di occlusione, la vicinanza ai punti di controllo del rilievo e le ostruzioni visive per ottenere risultati ottimali. La quantità di scansioni e la loro posizione ha inoltre reso possibile l'acquisizione anche del contesto architettonico adiacente. Infatti la maggior parte delle posizioni TLS è stata selezionata per garantire una significativa sovrapposizione (oltre il 60%) tra le scansioni.

Terrestrial Laser Scanning - TLS

Data la complessità architettonica delle superfici della Cattedrale di Aachen e la necessità di acquisire dati ad alta risoluzione, il progetto di rilievo ha previsto scansioni tra loro ravvicinate variando la configurazione delle posizioni di presa per un'estesa acquisizione digitale dell'esterno e dell'interno dell'edificio. Questo approccio ha garantito che quasi ogni dettaglio dell'edificio fosse accuratamente registrato, dagli interni riccamente decorati ai tetti e alla guglia esterna. In particolare, il rilievo della Cappella Palatina con la sua complessità strutturale e della travatura nel sottotetto sopra la sala del Coro gotico ha richiesto una progettazione ad hoc per garantire la corretta registrazione dei dati. Inoltre, una particolare attenzione è stata dedicata alla registrazione delle superfici superiori delle volte del coro e alla connessione strutturale unica tra queste [Bianchini 2020]. Ricerche precedenti [Wu et al. 2022] sottolineano i benefici del TLS e dei dati derivati dalla nuvola di punti mettendo in luce i vantaggi significativi rispetto ad altre tecniche grazie alla loro alta precisione, oggettività e portata di misurazione. Per le scansioni interne è stato utilizzato lo Zoller + Fröhlich Imager 5016, mentre per quelle esterne è stato impiegato l'Imager 5010X. Entrambi i sistemi impiegano una tecnologia a differenza di fase (*amplitude-modulated continuous wave, AMCW*), che offre maggiore precisione e velocità di misurazione rispetto ai sistemi basati sulla tecnologia a tempo di volo (ToF). Seb-

The Aachen project began as a collaborative research project between the three academic institutions, with the full support of the Cathedral administration. Based on the outcomes of previous cultural heritage documentation projects, the available equipment at that time, discussions with the Cathedral manager, and the initial desired outputs, TLS and photogrammetry were selected as the main recording methods. This operational workflow was intended to deliver the highest possible 3D detail and image resolution [Adamopoulos, Rinaudo 2019]. As in previous complex heritage visualisation projects, the approach taken in the Aachen Cathedral project typically follows the structure and sequence of events outlined in the European Commission study. The Historic England's Geospatial Survey Specifications for Cultural Heritage publication describes a similar project planning methodology [Historic England 2024].

Initial project planning relied on existing 2D CAD drawings of the cathedral to identify the locations of fixed survey control points. The drawings also helped determine the scanner positions, ensuring sufficient overlap between scans. The marked-up drawings were then used to estimate on-site work time, highlight potential health and safety issues, and facilitate communication with cathedral management. The documentation areas included the circumference of the exterior, including the ground, parapet, upper parapet, and balcony levels. The main interior spaces included the Westwork (the western facade), Entrance Hall, Gothic Choir Hall, the Carolingian Octagon (Palatine Chapel), the ambulatory, the upper gallery, the Chapel of Saint Nicholas, Chapel of Karls, Chapel of Saint Matthias, Chapel of Saint Anne, and the Hungarian Chapel. Additional spaces included the bell tower and the various levels of the attic (figs. 4, 5, 6).

Site control network

A previously generated topographic survey of the cathedral's exterior was provided, identifying the positions of ten permanent survey markers encircling the building. These markers served as survey control points and were integrated into the primary points cloud

4/ La cupola ornata della Cappella Palatina
(foto di Douglas Pritchard).
The ornate Palatine Chapel dome
(photo by Douglas Pritchard).

dataset to ensure accurate georeferencing and alignment of the captured data. The distance between these stations was less than 100 m, and all TLS positions were registered to the site control network.

When positioning the scanners, the Aachen project considered several factors, including capturing the overall architectural form and the elaborate exterior and ornate interior surface areas. The team carefully evaluated factors such as ideal laser range, data resolution, areas of occlusion, proximity to survey control points, and visual obstructions to achieve optimal scanning results. The adjacent architectural context was also captured. The positioning of most of the TLS locations was selected for significant (60%+) overlap between scans.

Terrestrial Laser Scanning - TLS

Given the Aachen Cathedral's complex architectural and surface features and the need for high-resolution data, the project employed short-distance scanning with multiple scan setups and extensive digital imaging of the building's exterior and interior. This approach ensured that almost every detail of the building was accurately recorded, from the intricately decorated interior to the roofs and spire of the exterior. A particular challenge was capturing the structural complexity of the Palatine Chapel dome and the trusswork in the attic above the Gothic Choir Hall. Specific attention was paid to recording the top surfaces of the choir vaults and the unique structural connection between them [Bianchini 2020].

Previous research [Wu et al. 2022] highlights the benefits of TLS and the resulting points cloud data. TLS systems offer significant advantages over other techniques due to their high accuracy, objectivity, and measurement range. The Zoller + Fröhlich Imager 5016 was employed for the interior scanning, while the Imager 5010X was used for the exterior scanning. Both systems utilise the phase-shift (amplitude-modulated continuous wave, AMCW) technique, which delivers greater ranging accuracy and measurement speed than scanners that depend on the time-of-flight technique (ToF). While they have a

bene abbiano una portata inferiore rispetto ai sistemi ToF, quelli a differenza di fase sono particolarmente adatti per alta precisione e dettaglio, rendendoli ideali per rilevare le caratteristiche architettoniche della Cattedrale. I modelli 5010X e 5016 generano nuvole di punti a 360 gradi basati su un sistema di coordinate locale con valori di riflettanza associati. Il 5010X ha una portata approssimativa di 187 m, mentre il 5016 arriva a 360 m, ideale per strutture come la Cattedrale e l'area circostante. Entrambi i sistemi hanno una velocità di acquisizione di 1,06 milioni di punti al secondo e un errore lineare inferiore a 1 mm entro 20 m dalla superficie. Durante il rilievo, entrambe le impostazioni TLS hanno mantenuto una spaziatura dei punti tra i 6,3 mm a 10 m e i 3,1 mm a 10 m, con risoluzioni più elevate, come 1,6 mm a 10 m, selezionate per aree critiche che richiedevano dettagli più accurati.

Il 5010X e il 5016 integrano una fotocamera CCD posizionata nel punto nodale dell'unità di scansione. La fotocamera del 5010X è leggermente fuori asse, causando una lieve

parallasse nei primi metri, problema superato nel 5016. Durante la post-elaborazione, le immagini si sovrappongono ai punti della nuvola senza parallasse, offrendo un dataset fotorealistico e correttamente allineato.

Completata la fase di scansione laser, il dispositivo avvia la ripresa fotografica mediante l'acquisizione di 42 singole fotografie HDR che si combinano per creare un'immagine panoramica a 360° da 80 megapixel. Inoltre, per illuminare gli spazi interni male illuminati, il 5016 è dotato di quattro spot LED integrati da 1000 lumen che evitano l'uso di fonti di luce esterne. La nuvola di punti texturizzata permette una maggiore riconoscibilità degli oggetti, e facilita la distinzione tra diverse colorazioni della pietra, migliorando l'accuratezza nelle applicazioni di mappatura e modellazione 3D. Sebbene non perfetta, l'integrazione del colore nei dati della nuvola di punti consente la creazione di modelli 3D visivamente più accurati e rappresentativi dell'ambiente reale [Huvila 2018]. Tutte le scansioni laser interne ed esterne della



5/ Il rinforzo strutturale sopra la cupola della Cappella Palatina (foto di Douglas Pritchard).
The structural brace above the Palatine Chapel dome (photo by Douglas Pritchard).

6/ Immagine di dettaglio del soffitto che mostra i colori e la texture della superficie (foto di Douglas Pritchard).
Ceiling detail, demonstrating the surface colours and texture (photo by Douglas Pritchard).



Cattedrale includevano immagini, sebbene ciò abbia inciso considerevolmente sui tempi di acquisizione. Il 5010X è compatibile con un sistema di illuminazione esterno, mentre gli spot LED integrati del 5016 consentono l'acquisizione di immagini senza necessità di fonti di luce aggiuntive. Questa caratteristica è pratica per la scansione di siti storici con condizioni di illuminazione disomogenee, garantendo una qualità d'immagine costante e un'acquisizione dei dati senza l'ausilio di illuminazione esterna.

La tecnica di acquisizione mediante laser scanner permette di ottenere dati 3D in breve tempo con una grande accuratezza nella rappresentazione delle superfici di un oggetto e una precisione straordinaria, raggiungendo valori sub-millimetrici. Le fotocamere interne dei modelli 5010X e 5016 offrono prestazioni eccellenti sebbene abbiano una risoluzione inferiore rispetto alla fotografia digitale ad alta risoluzione e siano meno versatili (poiché limitate a un singolo centro di proiezione). Di contro, attraverso l'impiego di processi fotogrammetrici è possibile elaborare nuvole di punti con elevato dettaglio e con colori realistici an-



che se con una precisione metrica inferiore e a patto che si realizzi una corretta illuminazione. L'integrazione del TLS con la fotogrammetria sia terrestre sia basata su droni consente di mitigare i limiti di ciascun metodo sfruttando i loro punti di forza combinati. Ciò porta a una documentazione più completa delle superfici, con meno occlusioni e, infine, a una maggiore precisione nella modellazione e a una migliore generazione delle texture [Giuliano 2014].

Fotogrammetria digitale

I recenti progressi nell'ambito dello sviluppo software, della risoluzione delle fotocamere

shorter range than ToF, phase-shift systems are particularly well-suited for high precision and detail, making them ideal for capturing the architectural features of the Aachen Cathedral. The 5010X and 5016 generate 360-degree point data based on a local coordinate system with associated intensity values. The 5010X has an approximate range of 187 m, while the 5016 has a range of 360 m, ideal for structures such as the Aachen Cathedral and the adjacent precinct. The systems have an acquisition rate of 1.06 million points per second, with a linearity error of less than 1 mm within 20 m from the surface. Both TLS recording settings had a set point spacing (angular resolution) of 6.3 mm at 10 m or 3.1 mm at 10 m throughout the project. Higher resolutions, such as 1.6 mm at 10 m, were selected for critical areas requiring exceptional surface detail.

The 5010X and 5016 have an integrated camera system, the CCD, positioned at the nodal point of the scanning unit. The 5010X's camera is slightly off-centre, so a slight parallax is noticeable on the first few meters. Parallax is not an issue with the 5016. During post-processing, the imagery sits precisely onto the point data without parallax, providing an aligned, photorealistic scan dataset.

Upon completing the laser scanning sequence, the systems can initiate a series of 42 individual HDR photographs that combine to create an 80-megapixel 360-degree panoramic image. Additionally, to illuminate dark interior spaces within the Cathedral, the 5016 has four built-in 1000 lumen LED spotlights, avoiding using external lighting sources. Coloured points cloud data can provide better object recognition, such as different stone colours, and classification and enhance the accuracy of 3D mapping and modelling applications. Although not perfect, integrating colour into points cloud data also enables the creation of more visually accurate 3D models that closely represent the real-world environment [Huviila 2018]. All interior and exterior Aachen laser scans incorporated imagery. However, this added additional production time to the individual setups. The 5010X is compatible with an external illumination system, while the 5016's

integrated LED spotlights enable image capture without relying on additional light sources. This feature is practical for scanning heritage sites with inconsistent lighting conditions. The built-in lighting system provides consistent image quality and data capture without external lighting. TLS provides fast and accurate 3D point data of an object's surface with remarkable precision, achieving sub-millimetre accuracy. The 5010X and 5016 feature excellent internal cameras, although they have lower image resolution capabilities compared to high-resolution digital photography and are less versatile as they are restricted to line-of-sight capture. TDP produces highly detailed and realistically coloured points, although it has lower metric accuracy, extensive overlapping imagery, and requires proper lighting. By integrating TLS with terrestrial and drone-based photogrammetry, the limitations of each method can be mitigated while leveraging their combined strengths. This leads to more comprehensive surface capture, fewer occlusions, improved modelling precision, and enhanced texture generation [Giuliano 2014].

Digital photogrammetry

Recent software advancements, digital camera resolution, and increased computer processing power have significantly improved the speed and quality of photogrammetric texture generation and 3D model accuracy. Terrestrial photogrammetry and UAV photogrammetry can provide improved 3D surface coverage, including hard-to-capture niches, and generate high-quality seamless textures.

As the quality of photogrammetry depends on the image quality, file resolution, and the camera's angle to the surface, perpendicular and angled shots (30°-60°) were used.

Extreme oblique (70°+) images, which will distort features and reduce accuracy, and under/overexposed photos were deleted from the photogrammetric image dataset.

The Aachen project used two digital cameras for terrestrial imagery: a Nikon Z 7II (47.7 MP) mirrorless full-frame camera and a Sony Alpha ILCE-A7 II (24.3 MP) full-frame

digitali e della potenza di elaborazione dei computer hanno significativamente migliorato la velocità di produzione e la qualità in termini di accuratezza dei modelli 3D e di texture derivate da processi fotogrammetrici. L'impiego combinato di fotogrammetria terrestre e UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) permette di migliorare l'acquisizione di superfici fortemente articolate, consentendo di accedere a zone altrimenti non rilevabili producendo una texturizzazione continua e qualitativamente elevata.

Poiché la qualità della fotogrammetria dipende dalla qualità e risoluzione delle immagini e dalla inclinazione della fotocamera rispetto alla superficie, sono state utilizzate riprese perpendicolari e inclinate (30°-60°). Le immagini troppo oblique (oltre 70°), che distorcono le caratteristiche e riducono l'accuratezza, insieme alle foto sottoesposte o sovraesposte, sono state eliminate dal dataset delle immagini fotogrammetriche.

Per il progetto di rilievo della Cattedrale sono state utilizzate due fotocamere digitali per le immagini terrestri: una Nikon Z 7II (47,7 MP) *mirrorless full-frame* e una Sony Alpha ILCE-A7 II (24,3 MP) *full-frame*, entrambe dotate di obiettivi a focale fissa da 24 mm. L'uso di obiettivi con una sola lunghezza focale semplifica la calibrazione, riduce le distorsioni ottiche e consente al software di produrre ricostruzioni 3D accurate.

Software di produzione come Epic Games Reality Capture sono diventati più automatizzati, riducendo la necessità di interventi manuali e aumentando la velocità di elaborazione. Di conseguenza, la creazione di geometrie 3D completamente texturizzate è diventata più rapida, fluida e accurata.

Nonostante i progressi software, un modello 3D completamente fotogrammetrico può risultare problematico per quanto riguarda l'accuratezza metrica, che è generalmente meno affidabile rispetto a quella ottenuta con i sistemi TLS. Una particolare problematica legata alle acquisizioni fotogrammetriche riguarda la combinazione di dataset realizzati per ambienti esterni con quelli di ambienti interni. Infatti gli algoritmi fotogrammetrici faticano a registrare superfici altamente riflettenti, come quelle all'inter-

no della Cappella Palatina, o superfici con pochi dettagli. Al contrario, il LiDAR (*Light Detection and Ranging*) offre risultati dimensionali accurati, costanti e ripetibili nella documentazione dei dettagli superficiali, indipendentemente dalle condizioni di illuminazione e texture.

Fotogrammetria con UAV

L'impiego di procedure di acquisizione basate su processi fotogrammetrici con UAV offre numerosi vantaggi nel contesto della documentazione di strutture storiche, tra cui costi hardware relativamente bassi (rispetto al TLS), versatilità, non invasività e capacità di produzione di immagini ad alta risoluzione. Grazie agli UAV è possibile accedere con grande flessibilità ad aree non raggiungibili dai laser scanner o dalle attrezzature fotografiche terrestri, rendendoli strumenti di grande valore per la conservazione, il restauro e la documentazione.

Sebbene sia possibile equipaggiare i sistemi UAV con fotocamere ad alta risoluzione, telecamere termiche e sistemi LiDAR, tale configurazione tende inevitabilmente ad aumentare il peso del velivolo rendendo necessaria la richiesta di permessi speciali. In Germania l'operatività degli UAV è regolata dalla Legge sull'Aviazione (*Luftverkehrsgesetz*) e dall'Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea (EASA). Le normative prevedono la registrazione di tutti gli UAV con peso superiore a 250 gr e procedure di volo rigorose e restrizioni simili sono presenti anche in altri paesi.

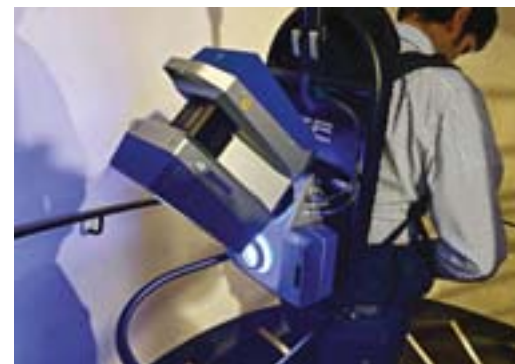
Nell'ambito del progetto, si è scelto di utilizzare un drone DJI Mini 3 Pro da 249 gr, dotato di un sensore CMOS da 1/1,3 pollici che fornisce immagini da 48 MP e un obiettivo f/1.7 da 24 mm. Il sistema automatico di acquisizione delle immagini del drone è in grado di produrre rapidamente centinaia di immagini. La sfida principale nell'utilizzo di un drone sotto i 250 gr presso la Cattedrale era legata alla sua suscettibilità ai venti improvvisi, che talvolta ne destabilizzavano il volo e compromettevano la qualità delle immagini.

La fotogrammetria basata su immagini derivate da UAV ha permesso di colmare sia le lacune causate da occlusioni sia quelle in

7/ Posizionamento del laser scanner tra due volte
(foto di Douglas Pritchard).
Positioning of the laser scanner between the two vaults
(photo by Douglas Pritchard).



8/ Rilievo della scala interna tramite Z+F Flexscan system
(foto di Douglas Pritchard).
Walking down the interior staircase using the Z+F Flexscan system
(photo by Douglas Pritchard).



corrispondenza di aree in quota difficilmente raggiungibili da laser scanner statici [Oliveira et al. 2014]. Tuttavia, il drone non è stato utilizzato all'interno della Cattedrale; per gli interni sono stati utilizzati solo scansioni laser e fotografie da terra.

La campagna fotografica ha complessivamente portato alla produzione di circa 8.145 immagini raw ad alta risoluzione. Circa il 55% delle foto, comprese quelle delle facciate, del campanile, della lanterna e dei tetti, coprivano l'intero esterno. La fotografia da terra e quella con drone sono state strutturate per integrarsi nel processo fotogrammetrico.

Oltre a completare i dati della nuvola di punti derivata da laser scanner 3D, l'elaborazione fotogrammetrica contribuisce significativamente a costruire un archivio fotografico consistente degli spazi primari e secondari di un sito. Se organizzate correttamente, le singole immagini possono costituire una preziosa fonte aggiuntiva di informazioni sull'edificio e sui manufatti che lo compongono. In caso di danni o distruzione di un sito monumentale, queste immagini risulterebbero inestimabili per la ricostruzione. Inoltre spingono il fotografo a documentare le aree meno interessanti o "di servizio", che potrebbero rivelarsi critiche in progetti o analisi future.

Scansione SLAM

Nell'ultima fase del progetto è stato utilizzato un sistema di scansione con *Simultaneous Localisation and Mapping* (SLAM) per incrementare la copertura dei dati derivanti da scansione laser. La tecnologia SLAM, relativamente recente, ottimizza la velocità del rilievo di ambienti interni complessi, come quelli della Cattedrale.

Il sistema di mappatura mobile utilizzato, Z+F FlexScan (Zoller + Fröhlich), abbinato all'Imager 5016, è stato utilizzato per documentare specifiche aree interne della Cattedrale con una morfologia particolarmente complessa: le due scale a chiocciola e il sottotetto sopra il coro e l'abside (figg. 7, 8). Mentre i sistemi TLS richiedono una messa in stazione su treppiede, la tecnologia SLAM consente di acquisire dati 3D in movimento. Questa facilità d'uso elimina la necessità di numerose scansioni statiche e permette una

raccolta di dati fluida e relativamente veloce su aree estese e complesse. Inoltre, l'integrazione con i dati acquisiti da TLS e con punti di controllo topografici, migliora la precisione dei dati, riducendo il processo laborioso di acquisizione di dati TLS georeferenziati, e compensa la ridotta accuratezza intrinseca nella scansione SLAM.

L'acquisizione dei dati degli ambienti interni è stata effettuata senza connettività GNSS e ha richiesto un percorso pianificato per calcolare con precisione l'algoritmo SLAM. Nelle aree delle due scale a chiocciola e del sottotetto sopra il coro e l'abside, i percorsi di scansione sono stati limitati a un massimo di 20 minuti di acquisizione continua per minimizzare l'errore progressivo, prevedendo un ritorno al punto di partenza per chiudere il percorso e garantire l'accuratezza della traiettoria. Questa scelta, definita in fase di progettazione del rilievo, ha considerato le specifiche tecniche dello strumento Z+F FlexScan 22, caratterizzato da una qualità di acquisizione dei dati comparabile al sistema statico Z+F IMAGER 5016. Ogni scansione è composta da 10.000 punti e garantisce una precisione fino a 2,5 mm, assicurando un elevato livello di dettaglio nel modello numerico complessivo.

Integrazione di dati aggiuntivi

La campagna di acquisizione dei dati non ha incluso l'utilizzo di tecnologie alternative, come il radar a penetrazione del suolo (GPR), né ha integrato i precedenti dati GPR 2D e 3D [Fernández-Steege et al. 2011; Barrile et al. 2022], poiché tali dataset non offrono la stessa precisione dimensionale rispetto ai

camera equipped with 24 mm prime lenses. Using fixed 24 mm prime lenses with a single focal length simplifies calibration, reduces optical distortions, and enables the software to produce accurate 3D reconstructions. Production software such as Epic Games Reality Capture has become more automated, reducing the need for manual intervention and increasing production processing speed. As a result, the creation of fully textured, 'watertight' 3D geometry has become faster, more streamlined and more accurate. Despite ongoing software development, a comprehensive photogrammetric-only 3D model can be challenging due to its dimensional accuracy, which is typically less dependable than that achieved with TLS. There are also issues related to integrating interior and exterior data. Photogrammetric algorithms can find it challenging to verify the registration of highly reflective surfaces, such as those in the interior of the Palatine Chapel, or of surfaces with sparse features. In contrast, LiDAR (Light, Detection and Ranging) provides accurate, consistent, and repeatable dimensional results when capturing surface detail, regardless of lighting and surface texture conditions.

UAV photogrammetry

UAV photogrammetry provides numerous advantages for recording heritage structures, including relatively low hardware cost (compared to TLS), versatility, noninvasiveness, and high-resolution imaging capabilities. UAVs are more flexible and can access areas well beyond the sight of terrestrial laser scanners or terrestrial photographic equipment, making

9/ Vista ortografica della nuvola di punti ottenuta dalla registrazione delle scansioni esterne e interne (elaborazione di Douglas Pritchard).
Orthographic plan view of the interior and exterior points cloud data (by Douglas Pritchard).

them invaluable conservation, restoration, and documentation tools.

Although UAV systems can carry high-resolution cameras, thermal cameras, and lidar systems, they tend to be heavy and require special permits. The operation of UAVs was subject in our case to the German Aviation Act (Luftverkehrsgesetz) and the European Union Aviation Safety Agency (EASA). The regulations also require the registration of all UAVs weighing more than 250 grams and strict flying procedures. Similar flight restrictions exist in other European countries. The project used a 249 gram DJI Mini 3 Pro drone. This unit has a built-in 1/1.3 inch CMOS camera sensor that provides 48 MP imagery and an f1.7 24 mm lens. Its automatic image capture system can quickly produce hundreds of images. The challenge of flying a sub-250-gram drone at the cathedral was its susceptibility to gusting winds, which occasionally destabilised it and affected image quality. The UAV photogrammetry filled in missing areas due to occlusions or hard-to-reach surfaces that the laser scanners may have missed [Oliveira et al. 2014]. The UAV was not flown inside the cathedral, and the interior dataset consisted of laser scans and terrestrial imagery. The TDP and UAV produced approximately 8,145 high-resolution .raw images. Approximately 55% of the photos, including the facades, bell tower, lantern, and roofs, encompass the entire exterior. Both terrestrial and drone photography were structured to complement the photogrammetric process. In addition to using the imagery to complement the points cloud data, a photogrammetric project has the additional benefit of forcing extensive imaging of a heritage site's primary and secondary spaces. If properly organised, the individual images can provide an extra, highly valuable building and artefact information source. These images would be invaluable in reconstruction efforts if a cultural heritage property were damaged or destroyed. It also forces the photographer to record the less interesting, 'back-of-house' areas that may be critical in future projects or analyses.

SLAM scanning

In the later stages of the project, a Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM) scanning

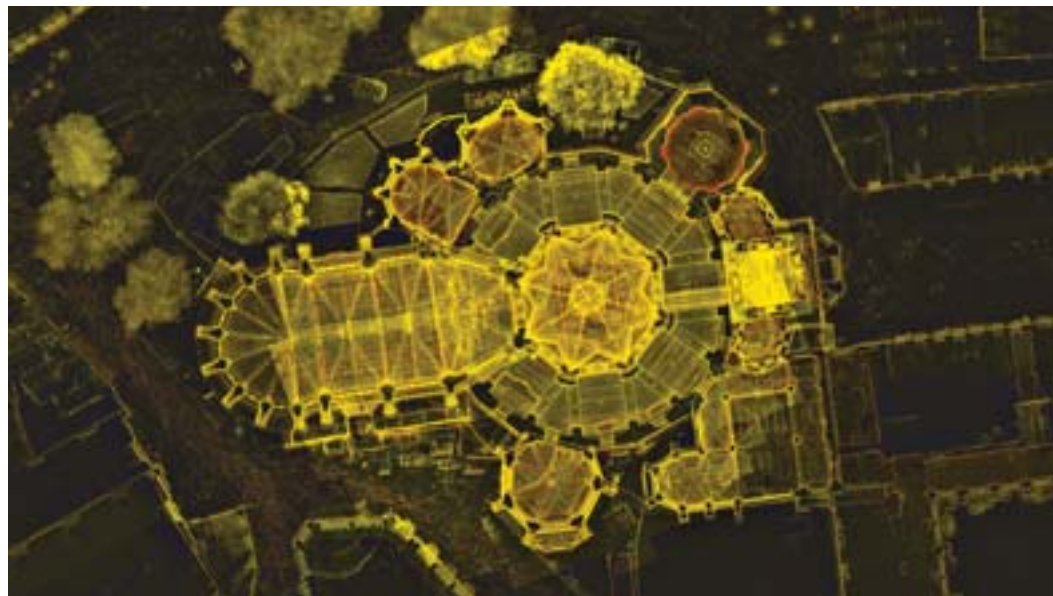
dati acquisiti tramite scanner laser e sistemi di fotogrammetria [Galeazzi 2017]. Analogamente, le precedenti scansioni laser 3D delle aree sottostanti il pavimento della cappella ottagonale non sono state considerate. Tuttavia l'integrazione dei dati raccolti con ulteriori dataset rappresenta un'importante opportunità di sviluppo per il progetto. Ad esempio, combinare i dati LiDAR aerei relativi alla regione di Aachen potrebbe fornire informazioni contestuali utili, offrendo una visione più ampia della relazione tra la Cattedrale e il suo contesto ambientale. La creazione di dataset integrati, derivanti dalla combinazione di diverse fonti, consentirebbe di sviluppare analisi predittive, come la simulazione dell'impatto dei venti, il drenaggio delle acque piovane, la valutazione del rischio di alluvioni, o l'ottimizzazione della gestione e del controllo dell'affollamento, in particolare durante eventi con alta affluenza o in situazioni di emergenza.

Acquisizione di dati

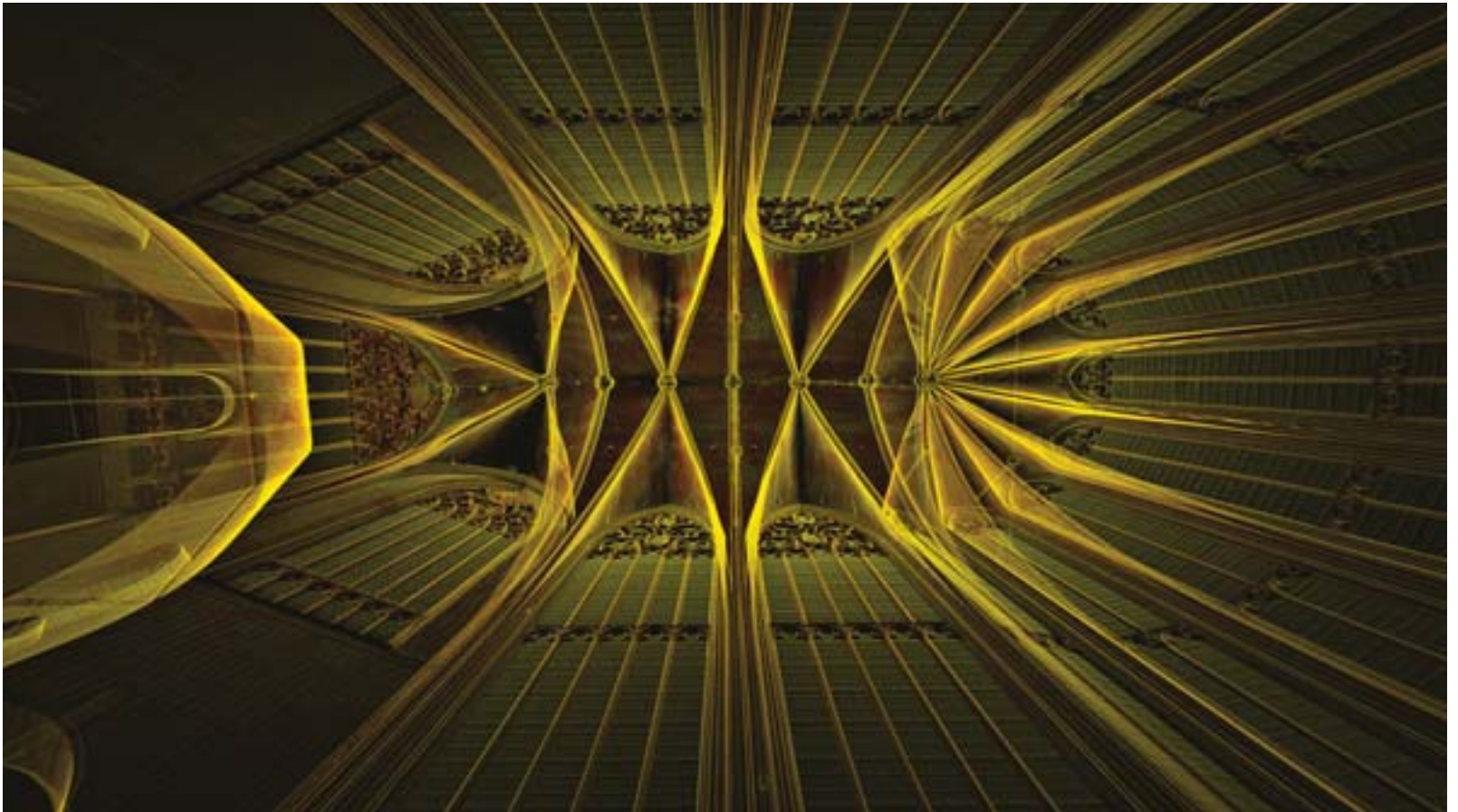
Nonostante il numero di turisti, membri dello staff e arredi mobili, i dati acquisiti hanno presentato ostruzioni minime, con errori di registrazione associati altrettanto ridotti. Dal punto di vista della costruzione geometrica del modello 3D numerico, il posizionamento del TLS all'interno della Cattedrale ha con-

sentito di rilevare da più angolazioni anche le aree nascoste, riducendo o eliminando le occlusioni. Dal punto di vista della costruzione di un modello 3D texturizzato, invece, la colorazione della nuvola di punti ottenuta tramite le fotocamere integrate del TLS ha dato ottimi risultati. I mosaici, i pannelli di marmo e la muratura risultano chiaramente visibili e ben leggibili nei dati texturizzati (fig. 9). Sebbene sia logisticamente auspicabile acquisire tutte le immagini e le scansioni in un'unica campagna, fattori come l'accesso limitato al sito, le condizioni meteorologiche, le occlusioni, i lavori di costruzione e gli imprevisti possono compromettere la quantità o la qualità dei dati iniziali raccolti.

I dati TLS sono stati controllati e registrati successivamente, identificando gli ostacoli, le connessioni di scarsa qualità e le aree mancanti; lo stesso approccio è stato applicato ai dataset fotogrammetrici. Questo è il motivo per cui progetti di documentazione complessi come questo richiedono diverse campagne per completare l'acquisizione dei dataset. Il rilievo della Cattedrale di Aachen, infatti, si è articolato in tre momenti differenti. Durante la prima campagna sono stati acquisiti la maggior parte dei dati, comprese le scansioni TLS e le immagini fotogrammetriche terrestri e da UAV. La seconda si è concentrata sulla scansione del campani-



10/ Il soffitto del coro, vista della nuvola di punti
(elaborazione di Douglas Pritchard).
*Rendering of the colourised points cloud data, looking
at the choir ceiling (by Douglas Pritchard).*
Tabella 1/ Numero di scansioni nelle diverse aree
(elaborazione di Douglas Pritchard).
*Table 1/ / Number of TLS Scans per Area
(by Douglas Pritchard).*



le, delle superfici superiori delle volte e dei livelli più alti delle aree del sottotetto del coro. Inoltre sono state fotografate le aree dell'esterno precedentemente ostruite da impalcature e reti di protezione. La terza campagna di rilievo, coincidente con un evento di divulgazione delle attività del pro-

getto [Aachen Cathedral 2024], ha previsto l'integrazione di alcune zone utilizzando lo scanner SLAM Z+F FlexScan (fig. 10). Un vantaggio fondamentale del TLS è la relativa facilità con cui i dataset interni ed esterni possono essere collegati. Gli scanner statici sono stati posizionati presso le soglie di tutte

backpack system was used to increase data acquisition. SLAM is a relatively new technology that excels at rapidly surveying complex indoor environments, such as the interior of a historic Cathedral. The Z+F FlexScan mobile mapping system (Zoller + Fröhlich), paired with the Imager 5016, was used to record specific interior areas of the Cathedral, specifically the two spiral staircases and the attic above the choir and apse (figs. 7, 8).

Whereas TLS systems require a fixed tripod setup, the backpack-based SLAM camera lets the operator record 3D data while moving. The manoeuvrability removes the need for numerous static scans and allows seamless, comparatively fast data collection over large or complex regions. Integrating TLS data and survey control points further enhances SLAM data quality. This combined approach mitigates the labour-intensive process of acquiring georeferenced TLS data while addressing the

Number of TLS Scans Per Area			
Exterior Area	Scans	Interior Areas	Scans
North	18	Ground Level	40
South	22	Octagon / Choir	85
East	10	Bell Tower	42
West	8	Lantern / Dome	48
West Square	8	Attic / Vaults	40
South West	9	Connected Residential	15
Balconies	7	Interior / Exterior Connections	8
Courtyard	7	Total	276
Roof/Parapet	23		
Exterior / Interior Connections	10	Interior Slam	3
Total	120		

reduced accuracy inherent in SLAM scanning. Indoor scanning was done without GNSS connectivity and required a planned pathway to calculate the SLAM algorithm accurately. For Aachen, scanning routes were typically limited to a maximum of 20 minutes of continuous capture time to minimise dimensional drift, with a return to the starting point to complete a loop and ensure trajectory accuracy. According to the manufacturer, the Z+F FlexScan 22 delivers point data and range quality comparable to the static Z+F IMAGER 5016. It achieves an accuracy of up to 2.5 mm in the SLAM results. Each profile scanned with the FlexScan 22 includes 10,000 points, providing high detail in the resulting 3D dataset.

Additional recording methods

It is worth noting that certain acquisition technologies, such as ground-penetrating radar (GPR), were not used in this data capture campaign, nor were the previous GPR 2D and 3D data utilised [Fernández-Steeger et al. 2011; Barrile et al. 2022]. GPR-derived 3D models do not have the same dimensional precision as data gathered through laser scanners and photogrammetry systems [Galeazzi 2017]. Similarly, the earlier 3D laser scans of the underfloor areas of the octagon chapel were not included. Integrating additional external 3D datasets presents a significant development opportunity for the future. For instance, combining aerial LiDAR data from the broader Aachen urban region could yield contextual information, providing a broader perspective on the Cathedral's relationship with its surrounding precinct. Given the capabilities of the registration and post-production software, there are methods to unite the various datasets for representation and predictive analysis. The combined datasets could simulate environmental impacts like wind patterns, rainwater drainage, and flood risks. They could also assist with crowd management and control planning, especially during high-traffic events or emergencies.

Data capture

Despite the number of tourists, staff, and movable furniture, the Aachen data had minimal occlusions, and the associated

le aperture esterne della Cattedrale, incluse porte, balconi e parapetti. Queste porzioni sono state accuratamente scansionate per collegare con precisione i dataset interni ed esterni. Il dataset 3D risultante dall'integrazione tra le nuvole di punti interne ed esterne ha consentito di comprendere e interpretare l'organizzazione spaziale della Cattedrale e il suo contesto. La possibilità di segmentare l'intero dataset 3D e di realizzare sezioni trasversali ha permesso un esame più approfondito delle caratteristiche architettoniche distintive come il tetto ornato, lo spazio del sottotetto e la cupola.

Nel complesso, sono state effettuate 396 singole scansioni TLS utilizzando i modelli 5010X e 5016, tre segmenti SLAM estesi (l'area del sottotetto e le due scale a chiocciola interne), e sono state scattate circa 8.145 immagini con il TDP e l'UAV (tabella 1). Per ottimizzare le operazioni di registrazione, i dati sono stati organizzati per spazi interni, esterni e livelli del tetto. Diciotto scansioni di collegamento hanno unito i dataset interni ed esterni, garantendo una registrazione accurata, inclusa l'integrazione tra i dati dei diversi ambienti.

Registrazione e post-produzione

Il processo di post-produzione dopo l'acquisizione dei dati si articola generalmente in quattro fasi: 1. registrazione dei dati, 2. pulizia dei dati, 3. segmentazione dei dati, 4. riconoscimento degli oggetti e 5. output [Pritchard et al. 2017; Wu et al. 2022]. Con TLS/TDP e all'interno del software fotogrammetrico Reality Capture di Epic, il *workflow* comprende: 1. organizzazione dei dati, 2. importazione dei dati .e57 e delle immagini, 3. allineamento, 4. ricostruzione, 5. texturizzazione e 6. output. Entrambi i flussi di lavoro si basano su dataset di nuvole di punti accurati e ben strutturati come componente fondamentale, necessari per la documentazione, la conservazione digitale a lungo termine e l'archiviazione.

I file delle scansioni interne ed esterne sono stati importati in Z+F Laser Control (Sapienza) e Leica Register 360 (RGU). Per ridurre gli errori, i file sono stati registrati *cloud-to-cloud* considerando solo l'architettura ed

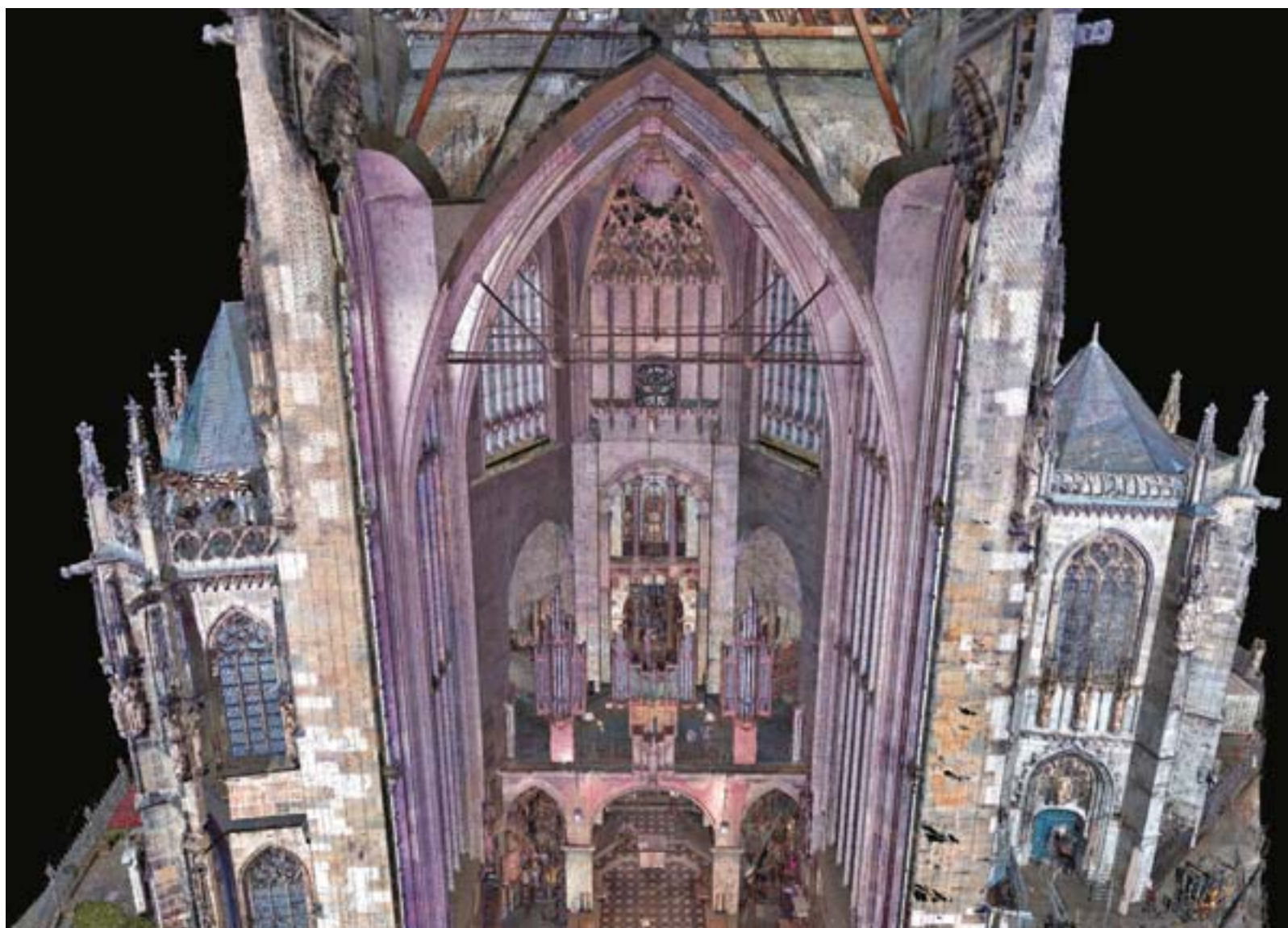
escludendo persone in movimento e chiome degli alberi, e successivamente collegati alla rete topografica.

I singoli file in formato .e57 del dataset registrato sono stati importati in Autodesk ReCap 360 (v. 2024, 2025) per ulteriore raffinamento e rimozione del rumore. Durante l'importazione in ReCap è stato applicato un filtro per la riduzione del rumore e i dati originali sono stati ottimizzati, con una conseguente lieve perdita di dettaglio. Le capacità di navigazione in tempo reale della piattaforma si sono dimostrate inestimabili per la revisione dei dati e le presentazioni. I file .rcp sono stati quindi integrati in altre applicazioni Autodesk per ulteriori sviluppi, inclusi AutoCAD e 3D Studio Max, e sono strutturati in modo tale da poter essere utilizzati anche all'interno di altri software come CloudCompare, Blender e Rhinoceros.

Come le scansioni, anche le immagini TDP e UAV acquisite sono state organizzate in gruppi relativi agli spazi interni, esterni, al sottotetto e ai livelli del tetto. Tutti i file immagine sono stati bilanciati cromaticamente e convertiti da .raw a .jpeg. I file .e57 registrati e puliti, insieme alle immagini, sono stati combinati e processati utilizzando il software Reality Capture. Per ottimizzare l'efficienza, sono state processate con il software Reality Capture due versioni del modello: una con le immagini dell'esterno, una con quelle dell'interno (figg. 11, 12). Ciò ha prodotto modelli 3D poligonali mesh eccezionalmente fotorealistici. Una delle principali sfide legate all'uso del software per la creazione di mesh 3D riguarda l'elaborazione di modelli di grandi dimensioni che, anche con una decimazione accurata e l'impiego di una workstation di alto livello, può richiedere tempi considerevoli. Inoltre, la navigazione all'interno di file pesanti risulta particolarmente dispendiosa in termini di risorse, mentre la pulizia dei poligoni, dei bordi e delle facce interconnessi per eliminare rumori e artefatti può essere un processo lungo e complesso.

Una volta esportati in applicazioni come Autodesk 3D Studio Max, la generazione di immagini è risultata lenta ma lineare. I modelli non ottimizzati sono stati importati a scopo

11/ Sezione trasversale del modello 3D mesh
 (elaborazione di Douglas Pritchard).
Cross-section through the centre of the 3D mesh model
 (by Douglas Pritchard).



sperimentale nel motore di gioco Unreal, all'interno di cui il peso delle mesh ha ridotto le prestazioni in real-time, ma mantenuto la visualizzazione fotorealistica dei modelli. Attualmente, sebbene siano in corso ricerche e avanzamenti da parte degli sviluppatori per migliorare gli strumenti finalizzati a una maggiore interoperabilità e scambio di conoscenze sui dati 3D [Bruno et al. 2022], la gestione di dataset di punti è più flessibile ed efficiente rispetto a quella dei modelli mesh 3D o ai modelli BIM/HBIM. Un vantaggio intrinseco della scansione laser è

che, nonostante le numerose scansioni ad alta risoluzione incluse nel progetto, il dataset della nuvola di punti rimane relativamente semplice: si tratta di una serie di punti non correlati all'interno di uno spazio 3D (figg. 13, 14, 15).

Un'ulteriore riflessione è stata fatta su un problema altrettanto significativo: la generazione eccessiva di file temporanei e la struttura rigida di file proprietari. Scambiare i file di progetto o l'intero dataset di Aachen tra sistemi o tra i collaboratori è risultato dispendioso in termini di tempo e di risorse,

registration had minimal error. By placing the TLS in numerous locations within the interior, blocked/hidden areas were recorded from multiple angles, reducing or eliminating occlusions. The colourisation of the points cloud through the onboard cameras on the TLS worked well. The mosaics, marble panels, and masonry are clear and legible within the coloured data (fig. 9).

Although acquiring all imagery and scans during a single documentation trip may be logistically desirable, limited site access, weather, occlusions, construction and

12/ Vista ortografica del modello 3D mesh del Westwork, facciata ovest (elaborazione di Douglas Pritchard).
Orthographic rendering of the 3D mesh model of the Westwork, west facade (by Douglas Pritchard).



unexpected events may reduce the quantity or quality of initial data collection. The initial TLS data capture is reviewed and registered in the office, and any obstructions, poor registration connections, or missing spaces are identified. This approach also applies when addressing gaps in photogrammetric imagery. This is typical of most complex documentation projects, requiring a second or more visits to address missing data.

The Aachen project benefited from three site visits. The first documentation trip provided most of the project's data, including TLS scans and terrestrial/UAV photogrammetric imagery. The second trip focused on scanning the bell tower, the upper surfaces of the vaults, and the upper structural levels of the choir attic areas. Additional photography was taken of the exterior, including areas previously obstructed by scaffolding and construction netting. During the third trip, coinciding with a

se. Sebbene la capacità dei software 3D di scambiare e utilizzare informazioni sia migliorata di recente, è ancora limitata a un metodo basato su importazione/modifica/esportazione tramite più programmi – ad esempio, la registrazione dei dati in un'applicazione, la modifica dei dati di punti in un'altra e la generazione della mesh 3D fotogrammetrica in un'ulteriore applicazione. Questo approccio frammentato aumenta la complessità delle operazioni e crea una dipendenza da molteplici software, formati e tipi di file, influenzando in termini complessivi la gestione dei file, l'accessibilità e la sostenibilità dei dati.

A differenza della natura leggera dei dati grezzi di punti con il loro formato *open-source* .e57, anche l'archiviazione a lungo termine dei file di produzione fotogrammetrici rappresenta un problema. L'interoperabilità efficace dei dati di mesh pesanti all'interno di

applicazioni GIS, CAD, BIM e software per il gaming è ugualmente complessa.

In questo progetto è emerso chiaramente che i modelli mesh 3D fotorealistici risultano più vantaggiosi per la visualizzazione e la presentazione. Sebbene il progetto di Aachen comprenda una grande quantità di scansioni e immagini, che hanno presentato sfide significative di elaborazione anche su sistemi informatici di alto livello, i progressi in corso nell'hardware e nel software renderanno sempre più gestibili tali dataset di grandi dimensioni in futuro. Si prevede infatti che le tecnologie emergenti, tra cui l'elaborazione basata su *cloud*, l'intelligenza artificiale, la visione artificiale e algoritmi ottimizzati per la manipolazione di dati 3D, nuvole di punti e mesh, semplificheranno i flussi di lavoro, consentendo a ricercatori, architetti e amministratori di siti di gestire, archiviare e condividere dataset di grandi

13/ Vista dell'interno della nuvola di punti (elaborazione di Douglas Pritchard).
View of the interior of the points cloud (by Douglas Pritchard).

dimensioni in modo più efficace [Mirzaei et al. 2022; Enenche et al. 2024].

Conclusioni

Le tecniche di registrazione dei dati e i risultati del progetto sulla Cattedrale di Aachen offrono un approccio replicabile per attività simili di documentazione del patrimonio. Questo progetto sottolinea i benefici e le sfide dell'uso di tecnologie di registrazione complementari per fornire una copertura completa delle superfici di una struttura storica, come la Cattedrale UNESCO. Grazie all'uso di scansione laser terrestre, fotogrammetria digitale terrestre e fotogrammetria digitale basata su UAV, il progetto ha beneficiato di dati ad alta risoluzione, geometricamente precisi e fotorealistici dell'architettura, delle superfici e dei materiali dell'edificio. L'applicazione di un approccio integrato di diverse metodologie di rilievo ha migliorato l'efficienza delle varie attività, in particolare per le aree complesse e di difficile accesso.

Il progetto della Cattedrale ha sottolineato l'importanza di creare modelli 3D con alta affidabilità geometrica, in particolare quelli derivati da dense nuvole di punti, il cui livello di affidabilità è fondamentale per la conservazione del patrimonio globale, dato il crescente rischio rappresentato da eventi naturali e antropici, come i cambiamenti climatici, il

turismo eccessivo, lo sviluppo urbano e i conflitti. I dati 3D acquisiti preservano l'essenza storica della Cattedrale in una forma digitale senza tempo, mantenendo una connessione geometrica dimostrabile con l'edificio. Inoltre, i dati possono adattarsi a future applicazioni non previste grazie all'elevata fedeltà della registrazione. La precisione del processo lo rende applicabile per documentare, in modo altrettanto approfondito e preciso, siti del patrimonio culturale di ambito nazionale e internazionale.

Ringraziamenti

Siamo grati a Jan Richarz, il Master Builder (*Dombaumeister*), e al personale della Cattedrale di Aachen per il loro supporto, la guida e l'accesso al sito. Il team di progetto è composto da Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffio, Carlo Inglese e Guglielmo Villa del Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura di Sapienza Università di Roma (Italia), e Yannick Ley e Bruno Schindler della RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Architekturgeschichte (Germania).

Ringraziamo per l'assistenza generosa Dr. Christoph Fröhlich, Christopher Held, Daniel Blerch e Zoller + Fröhlich.

Traduzione dall'inglese di Martina Attenni e Marika Griffio

14/ Pagina successiva. Vista dell'interno della nuvola di punti (elaborazione di Douglas Pritchard).
Next page. View of the interior of the points cloud (by Douglas Pritchard).

media dissemination event [Aachen Cathedral 2024], the team conducted scans using the Z+F FlexScan SLAM scanner (fig. 10).

The TLS systems were positioned at the thresholds of all the cathedral's external openings, including doorways, balconies, and parapets. These position points were thoroughly scanned to accurately link the interior and exterior scan datasets. By combining interior and exterior points cloud data, the resulting 3D dataset of the building aids in understanding and interpreting its spatial organisation and context. Integrated points cloud data enables rapid data segmentation, cross-sections, and 2D plans, allowing for a closer examination of distinct architectural features such as the Cathedral's ornate roof, attic space, and dome. One critical advantage of TLS is the relative ease with which interior and exterior datasets can be linked – which is more challenging to achieve with a photogrammetric-only approach.

By the project's conclusion, 396 individual TLS scans were using the 5010X and 5016, three extensive SLAM segments (the attic area and the two internal spiral staircases), and approximately 8,145 images were captured with the TDP and UAV (table 1). The data was organised by interior spaces, exterior, and roof levels for production purposes. Eighteen cross-over scans connected the interior and exterior datasets. Registration worked well, including connecting the interior and exterior datasets through the cross-over scans.

Registration and post-production

Similar to previous TLS projects, the post-capture production process typically involves four stages: (1) data registration, (2) data clean-up, (3) data segmentation, (4) object recognition, and (5) output [Pritchard et al. 2017; Wu et al. 2022]. With TLS / TDP and within Epic's Reality Capture photogrammetric software, the workflow is: (1) data organisation, (2) .e57 and image data import, (3) data alignment, (4) reconstruction, (5) texturing and (6) output. Both production workflows rely on an accurate and well-structured points cloud dataset as their foundational component. Due to its efficient structure, points cloud data is valuable for documentation, long-term digital







15/ *Pagina precedente*. Vista dell'esterno della nuvola di punti (elaborazione di Douglas Pritchard).
Previous page. *View of the exterior of the points cloud* (by Douglas Pritchard).

preservation, and archiving. The interior and exterior scan files were imported into Z+F Laser Control (Sapienza) and Leica Register 360 (RGU). To reduce errors, the files were registered cloud-to-cloud based on the immovable architecture, disregarding moving people and tree canopies and then connected to the ground survey network. Individual .e57 format files from the registered dataset were imported into Autodesk ReCap 360 (v. 2024, 2025) for further data and noise clean-up. When importing into ReCap, a noise filter is applied and the original data is optimised, which can result in a slight loss of detail. The platform's real-time navigation capabilities have proven invaluable for data review and presentations. The .rcp files were then integrated into other Autodesk applications for further development, including AutoCAD and 3D Studio Max. The data could also be imported into other production applications such as CloudCompare, Blender and Rhino. For the Aachen project, the acquired TDP and UAV images were organised into interior, exterior, attic and roof-level groups for further production. All the image files were colour-balanced and converted from .raw to .jpeg. The registered and cleaned .e57 files and images were combined and processed using the Reality Capture software. For efficiency, two model versions were processed using the Reality Capture software, one with a textured exterior and one with a textured interior (figs. 11, 12). This resulted in exceptionally photorealistic 3D polygonal meshed models. Once exported into an application such as Autodesk 3D Studio Max, generating images was slow but straightforward. The unoptimised models were brought into the Unreal Game Engine as a trial. The heavy mesh reduced the real-time performance, but the visual results were photorealistic. The challenge of 3D meshing software is that even with careful decimation on a high-end workstation, processing large mesh models can be time-consuming. Navigating the heavy files is resource-intensive, and cleaning the interconnected polygons, edges, and faces to remove noise and artefacts can be laborious.

Although there is ongoing research and commercial advancements to enhance tools for better interoperability and knowledge exchange of 3D data [Bruno et al. 2022], managing point data is more flexible and efficient than heavy 3D meshes or BIM/HBIM models. One inherent benefit of laser scanning is that despite the numerous high-resolution scans within the project, the points cloud dataset is relatively straightforward: it consists of a series of unrelated points within a 3D space (figs. 13, 14, 15). A notable concern is the excessive generation of temporary production files and a rigid proprietary file structure. Transferring project files or the entire Aachen dataset between system or collaborators can be challenging. While the ability of 3D software to exchange and use information has improved recently, it is still limited to a multi-program import/edit/export production method – for example, data registration in one application, editing point data in another, and generating photogrammetric 3D mesh in yet another. This disjointed approach increases production complexity and creates a reliance on multiple software formats and file types. These activities present long-term challenges for file management, accessibility, and data sustainability. Unlike the lightweight nature of raw point data with its open-source .e57 format, the long-term data archiving of photogrammetric production files is also an issue. The effective interoperability of heavy mesh data within GIS, CAD, BIM, and game engine applications is equally challenging. It was evident in this project that photorealistic 3D mesh models are more advantageous for visualisation and presentation. Although the Aachen project generated an extensive quantity of scans and imagery that presented significant processing challenges even on high-end computing systems, ongoing advancements in hardware and software will make handling such large datasets increasingly feasible in the future. Emerging technologies, including cloud-based processing, artificial intelligence, machine vision, and optimised algorithms for 3D, point cloud, and mesh manipulation, are anticipated to streamline workflows, enabling researchers, architects, and site managers to manage,

store, and share large datasets more effectively [Mirzaei et al. 2022; Enenche et al. 2024].

Conclusion

The Aachen Cathedral project's extensive recording techniques and results offer a replicable approach for similar heritage documentation projects. This project highlights the benefits and challenges of using complementary recording technologies to provide comprehensive surface coverage of a historic structure, such as the UNESCO Cathedral. Using Terrestrial Laser Scanning, Terrestrial Digital Photogrammetry, and UAV-based Digital Photogrammetry, the project successfully captured high-resolution, geometrically precise, and photorealistic data of the building's intricate architecture, surfaces, and materials. Integrating a combined laser scanning and photogrammetric approach enhanced the project's efficiency, particularly for complex and hard-to-reach areas.

The Aachen Cathedral project emphasised the importance of creating 3D models with high geometric accuracy, particularly those derived from captured dense 3D point clouds, as they are more legitimate than less accurate computer-generated 3D models. The level of accuracy is critical for conserving global heritage, given the growing threats from natural and man-made events, such as climate change, excessive tourism, urban development, and conflict. The acquired 3D data preserves the cathedral's historical essence in a timeless digital form by maintaining a demonstrable geometric connection to the building. Additionally, the data can accommodate future unanticipated applications due to the high fidelity of the recording. Similar national and international heritage sites should be recorded as thoroughly and precisely as possible through reliable methods if the resources are available.

Acknowledgements

We are grateful to Jan Richarz, the Master Builder (Dombaumeister) and the staff of the Aachen Cathedral for their support, guidance and access.

The project team consisted of Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini,

Marika Griffó, Carlo Inglese, and
Guglielmo Villa from the Department of
History, representation and restoration
of architecture, Sapienza University of

Rome (Italy), and Yannick Ley and Bruno
Schindler from RWTH Aachen University,
Lehrstuhl für Architekturgeschichte
(Germany).

We are grateful for the generous assistance of
Dr. Christoph Fröhlich, Christopher Held,
Daniel Blersch, and Zoller + Fröhlich.

English text by the author

References

- Aachen Cathedral 2024 = *An almost perfect digital twin of Aachen Cathedral*. <<https://www.aachenerdom.de/en/2024/01/13/an-almost-perfect-digital-twin-of-aachen-cathedral/>>.
- Adamopoulos, Rinaudo 2019 = Efstathios Adamopoulos, Fulvio Rinaudo. 3D interpretation and fusion of multidisciplinary data for heritage science: a review. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2-W15-17-2019, pp. 17-24. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-17-2019>>.
- Attenni et al. 2023 = Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffó, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa. The vaulting system of the Palatine Chapel: The Aachen Cathedral World Heritage Site Documentation Project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 119-128. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-119-2023>>.
- Barrile et al. 2022 = Vincenzo Barrile, Ernesto Bernardo, Antonino Fotia, Giuliana Bilotta. Integration of laser scanner, ground-penetrating radar, 3D models, and mixed reality for artistic, archaeological, and cultural heritage dissemination. *Heritage*, 5 (3), 2022, pp. 1529-1550. ISSN: 2571-9408. <<https://doi.org/10.3390/heritage5030081>>.
- Bianchini 2020 = Carlo Bianchini. A Methodological Approach for the Study of Domes. *Nexus Network Journal*, 22 (4), 2020, pp. 983-1013. ISSN: 1590-5896. <<https://doi.org/10.1007/s00004-020-00526-9>>.
- Bruno et al. 2022 = Silvana Bruno, Albina Scioti, Alessandra Pierucci, Rocco Rubino, Tommaso Di Nola, Fabio Fatiguso. VERBUM - Virtual enhanced reality for building modelling (virtual technical tour in digital twins for building conservation). *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 2022, pp. 20-47. ISSN: 1874-4753. <<https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.002>>.
- Daneshmand et al. 2018 = Morteza Daneshmand, Ahmed Helmi, Egils Avots, Fatemeh Noroozi, Fatih Alisinanoglu, Hasan Sait Arslan, Jelena Gorbova, Rain Eric Haamer, Cagri Ozcinar, Gholamreza Anbarjafari. 3D scanning: A comprehensive survey. *arXiv.org*, 24, January 2018. ISSN: 2331-8422. <<https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.08863>>.
- Enenche et al. 2024 = Patrick Enenche, Dong Ho Kim, Dongo You. On the road to the metaverse: Point cloud video streaming: Perspectives and enablers. *ICT Express*, 2024. ISSN: 2405-9595. <<https://doi.org/10.1016/j.icte.2024.11.001>>.
- European Commission 2022 = European Commission: Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology. *Study on quality in 3D digitisation of tangible cultural heritage - Mapping parameters, formats, standards, benchmarks, methodologies, and guidelines - Executive summary*. Publications Office of the European Union, 2022. ISBN: 9789276513162. <<https://data.europa.eu/doi/10.2759/581678>>.
- Fernández-Steeger et al. 2011 = Toms Fernández-Steeger, Christoph Grützner, Klaus Reicherter, Andreas Schaub. Aquisgrani terrae motus factus est (part 1): The Aachen cathedral (Germany) built on weak ground? *Quaternary International*, 242, 2011, pp. 138-148. ISSN: 1040-6182. <<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.05.004>>.
- Galeazzi 2017 = Fabrizio Galeazzi. 3D recording, documentation and management of cultural heritage. *International Journal of Heritage Studies*, 23 (7), 2017, pp. 671-673. ISSN: 1470-3610. <<https://doi.org/10.1080/13527258.2017.1300933>>.
- Giuliano 2014 = M.G. Giuliano. Cultural heritage: An example of graphic documentation with automated photogrammetric systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-5, 2014, pp. 251-255. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-251-2014>>.
- Hassan, Fritsch 2019 = Amin Talha Hassan, Dieter Fritsch. Integration of laser scanning and photogrammetry in 3D/4D cultural heritage preservation - A review. *International Journal of Applied Science and Technology*, 9, 4, 2019, pp. 9-16. ISSN: 2277-8691. doi:10.30845/ijast.v9n4p9.
- Huvila 2018 = Isto Huvila. The subtle difference between knowledge and 3D knowledge. *Hamburger Journal für Kulturanthropologie*, 7, 2018, pp. 99-111. ISSN: 2363-8753. <<https://journals.sub.uni-hamburg.de/hjk/article/view/1196>>.
- Historic England 2024 = Historic England. *Geospatial survey specifications for cultural heritage*. York: Historic England, 2024. <<https://historicengland.org.uk/images-books/publications/geospatial-survey-specifications-cultural-heritage/>>.
- Mirzaei et al. 2022 = Kaveh Mirzaei, Mehrdad Arashpour, Ehsan Asadi, Hossein Masoumi, Yu Bai, Ali Behnood. 3D point cloud data processing with machine learning for construction and infrastructure applications: A comprehensive review. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 2022, 101501. ISSN: 1474-0346. <<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101501>>.
- Oliveira et al. 2014 = Adriano Oliveira, João F. Oliveira, João M. Pereira, Bruno R. De Araújo, João Boavida. 3D modelling of laser scanned and photogrammetric data for digital documentation: The Mosteiro da Batalha case study. *Journal of Real-Time Image Processing*, 9(4), 2014, pp. 673- 688. ISSN: 1861-8219. <<https://doi.org/10.1007/s11554-012-0276-2>>.
- Pritchard et al. 2017 = Douglas Pritchard, Joerg Sperner, Sophie Hoepner, Ruth Tenschert. Terrestrial laser scanning for heritage conservation: The Cologne Cathedral documentation project. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W2, 2017, pp. 213-217. ISSN: 2194-9050. <<https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-213-2017>>.
- Pritchard et al. 2023 = Douglas Pritchard, Marika Griffó, Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Yannick Ley. Evolution of recording methods: the Aachen Cathedral World Heritage Site documentation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1241-1249. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1241-2023>, 2023>.
- Remondino 2011 = Fabio Remondino. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3 (6), 2011, pp. 1104-1138. ISSN: 2072-4292. <<https://doi.org/10.3390/rs3061104>>.
- Wu et al. 2022 = Chao Wu, Yongbo Yuan, Yang Tang, Boquan Tian. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*, 22 (1), 2022, p. 265. ISSN: 1424-8220. <<https://doi.org/10.3390/s22010265>>.



<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-05.pdf>

Charlemagne's Palatine Chapel in Aachen, conceived as a central structure with an octagonal plan, exhibits precise geometric relationships between the central space and the surrounding sixteen-sided galleries. A dimensional and proportional analysis conducted in 2017 reconstructed the building's geometry, revealing the harmonious interplay of elements such as pillars and arches, based on $\sqrt{2}$ as a parameter for the octagonal form. A full-scale 1:1 reconstruction demonstrated the chapel's significant aesthetic impact. High-resolution 3D scanning surveys conducted in recent years have precisely documented the structure and provided a robust basis for further research. This study highlights the complementarity of both methods: while 3D scanning confirms the unique geometric features of the Chapel, it also reveals surface deformations accumulated over 1,200 years, offering insights into the historical evolution of the building.

Keywords: Aachen Palatine Chapel, architecture, octagonal structure, geometric relationship, survey, proportional analysis.

The small plane took off and lifted off from the grassy airfield with a jerk and a roar. We, the survey team and the pilot, had our headsets on. We were still able to communicate verbally, but the immediate experience of the rapid ascent in the small plane left us speechless at first. We passengers were wide-eyed as we watched the rapidly changing perspective from the cramped cockpit. Later, when the pilot had stabilized the course of the high-winged aircraft towards Aachen, we could see the Palatine Chapel towering in the middle of the city's sea of houses, the spectacular church building of Charlemagne surrounded by its Gothic chapel wreath, which dominates with dome and lantern its own architectural center: We had studied this Carolingian core of the oldest World Heritage Site in Germany, we had reconstructed the central building idea and also measured out the basic plan of the building in a field experiment outside the city, a little further to the west, in Belgium on a meadow with pegs and ropes and drew its plan precisely with fine white sand in the lush green of the meadow. The real building in the center of the historic city now glided past us, aerial and souvenir photos were taken (fig. 1). But then all eyes turned back to the front, to our actual destination beyond the Aachen city forest and

Bruno Schindler

La geometria della Cappella Palatina di Aachen e il sistema di misurazione pratica applicato in cantiere *The geometry of the Aachen Palatine Chapel and the practical measurement system on the building site*

La Cappella Palatina di Carlo Magno ad Aachen, concepita come struttura centrale a pianta ottagonale, mostra precise relazioni geometriche tra lo spazio centrale e le gallerie a sedici lati. Un'analisi del 2017 ha ricostruito la geometria dell'edificio, evidenziando l'armonia tra elementi come pilastri e archi, basata sul parametro $\sqrt{2}$ a supporto della forma ottagonale. Una ricostruzione in scala 1:1 ha messo in luce il suo grande impatto estetico. Il rilievo tramite scansioni ad alta risoluzione condotto negli ultimi anni, invece, ha documentato con precisione la struttura e fornito la base per ulteriori studi. Questo contributo mette in evidenza come i due metodi siano complementari: la scansione 3D conferma le caratteristiche geometriche uniche della Cappella, mentre rivela anche deformazioni accumulate in milleduecento anni, che testimoniano l'evoluzione storica dell'edificio.

Parole chiave: Cappella Palatina di Aachen, architettura, struttura ottagonale, relazioni geometriche, rilievo, analisi proporzionale.

Il piccolo aereo era decollato dalla pista erbosa con uno scossone e un rombo. Noi, il team di rilevamento, e il pilota indossavamo le cuffie. Potevamo ancora parlare tra di noi, ma la rapida salita in quota nel piccolo velivolo ci aveva lasciati senza parole. Noi passeggeri, con gli occhi spalancati, osservavamo dalla piccola cabina la prospettiva che cambiava rapidamente. Poi, quando il pilota aveva stabilizzato la rotta del velivolo ad ala alta verso Aachen, riuscimmo a vedere la Cappella Palatina svettare in un mare di case: l'imponente chiesa di Carlo Magno circondata dalla sua corona di cappelle gotiche, dominata dalla cupola e dalla lanterna al centro. Avevamo studiato il nucleo carolingio del più antico

sito del Patrimonio Mondiale in Germania, avevamo ricostruito l'idea progettuale dell'edificio centrale e misurato la sua pianta in un esperimento condotto un po' più a ovest, in Belgio. Qui, in un campo erboso fuori città, con l'uso di picchetti e corde, avevamo tracciato la pianta dell'edificio sul prato verdeggiante con precisione, utilizzando della sabbia bianca.

Ora l'edificio si ergeva di fronte a noi, proprio al centro della città storica; avevamo ripreso immagini aeree e scattato foto ricordo (fig. 1). Ma poi tutti abbiamo rivolto nuovamente lo sguardo verso la nostra vera destinazione a ovest, oltre la foresta cittadina di Aachen e il confine belga.



1/ *Pagina precedente.* Veduta aerea di Aachen
(foto di Bruno Schindler).

Previous page. *Aerial view of Aachen*
(photo by Bruno Schindler).

2/ Veduta aerea dell'esperimento del 2017 eseguito
sul campo (foto di Bruno Schindler).

Aerial view of the trade fair experiment, 2017
(photo by Bruno Schindler).



Una vista dall'alto è sempre rivelatrice di aspetti normalmente nascosti nella banalità del quotidiano. Estesi in tutte le direzioni, gli insediamenti suburbani seguivano le strade di campagna e si fondevano lentamente nell'immensità del paesaggio. Un susseguirsi di aree boschive, ruscelli e valli, ma improvvisamente è apparso qualcosa di straordinario e per nulla banale: una forma tondeggiante risplendeva di un bianco argenteo. Un segno deciso e nitido, in cui si potevano riconoscere le sezioni dei muri della pianta della Cappella Palatina di Carlo Magno, che avevamo sorvolato poco prima (fig. 2). La struttura di sabbia delineava una geometria che non poteva lasciare indifferenti: tutti ne fummo subito entusiasti. L'aereo volava in stretti cerchi intorno alla pianta tracciata sul terreno, offrendoci una vista dall'alto del sito dell'esperimento. Ora riuscivamo a vedere, da un'altezza di 150 piedi, tutte le corde che avevamo legato sul terreno. Una settimana di duro lavoro si rendeva visibile di fronte a noi. Tutto è accuratamente documentato mediante fotografie (fig. 3). Stavamo già tornando indietro, ma le emozioni permanevano. L'impressione suscitata da quella pianta dell'edificio originario, che avevamo tracciato passo dopo passo sul prato in scala reale, come si sarebbe fatto milleduecento anni fa, secondo una sequenza rigorosamente stabilita,

misurata con precisione in piedi secondo i dati originali, è indimenticabile.

Sei anni dopo, gli scanner sono nella Cattedrale e nelle piazze circostanti, nel cuore della città. I droni sorvolano la cupola, la torre e i tetti delle cappelle annesse all'edificio. Sotto la direzione del professor Carlo Bianchini e del professor Douglas Pritchard è stato creato, passo dopo passo, un modello digitale, sono stati registrati milioni di punti dell'interno e dell'esterno dell'edificio ed è stata realizzata una documentazione fotografica a colori. Il team di rilevamento italiano della Sapienza Università di Roma ha creato un rilievo complessivo molto accurato della struttura dell'edificio mettendo insieme modelli parziali. L'edificio è stato esaminato da una infinità di angolazioni al fine di acquisire dati completi e accurati. Il team di rilevamento è tornato ad Aachen per diverse campagne di rilievo. Al termine di tutta l'attività è stato possibile analizzare virtualmente l'edificio direttamente sullo schermo di un computer.

Il modello digitale di questo sito riconosciuto Patrimonio Mondiale dell'Umanità fornisce all'architetto della Cattedrale uno strumento importante per programmare i lavori di conservazione. Ciò che in precedenza poteva essere pianificato solo per aree limitate, ora può essere programmato per l'intero edifi-

the Belgian border in the west. A view from above always reveals insights into the normally hidden banalities of everyday life. Suburban settlements spread out, run along country roads and slowly merge into the vastness of the landscape. Wooded areas are followed by streams and valleys – but suddenly something extraordinary and by no means banal emerged: an almost round shape shines silver-white.

An emphatically sharply drawn pattern in which sections of the walls of the floor plan of Charlemagne's Palatine Chapel, which had just before flown over, became visible (fig. 2). The sand structure drew a geometry that leaves no one uninvolved: everyone becomes immediately enthusiastic about. The plane flies round and round in tight curves around the ground plan, giving us an above view of our test site. We see all the ropes we had tied off at close range, now from a height of 150 feet. A week of hard work unfolds before us. Everything is carefully documented in photographs (fig. 3). We are already flying back, but the emotions remain. The impression of the reconstructed original building plan, which we had constructed step by step, as it should have been done 1,200 years ago, on the meadow with the original building dimensions, in a strictly prescribed sequence, precisely measured in feet according to the original building findings, is unforgettable. Six years later scanners are standing in Aachen Cathedral and in the surrounding squares in the heart of the city. Drones fly over the dome, the tower and the roofs of the chapels attached to the building. Under the direction of Professor Carlo Bianchini and Professor Douglas Pritchard, a digital model is created step by step, millions of points are recorded on the inside and outside of the building and documented photographically in color. The Italian surveying team of the Sapienza University of Rome creates a highly precise overall survey of the building fabric from individual partial models of the building documentation. The building must be approached from a wide variety of angles in order to generate complete and accurate data. The surveying team from Italy returns to Aachen for several surveying campaigns. Finally, the building can be virtually inspected and viewed on the screen.

3/ Particolare dell'esperimento del 2017
(foto di Bruno Schindler).
Partial view of the trade fair experiment, 2017
(photo by Bruno Schindler).

The digital model of the World Cultural Heritage site provides the today's Aachen Cathedral's master builder with a powerful tool for planning conservation works in advance. What could previously only be planned in limited areas can now be displayed comprehensively for the entire building: hidden structural damages, crane movements across all roofs, the visibility of building interventions, the structural statics of building elements from different construction phases of Aachen Cathedral, which not only has a Carolingian center, but consists of many individual buildings that have been added to the former Palatine Chapel of Charlemagne over the course of more than 1,200 years of building history. The consistency of all building dimensions, i.e. the precision with which all parts can be measured in the virtual model as well as in reality, is not only due to the well-functioning scanner, but above all to the work of the surveying team, which was able to combine the individual scans into one complete model. Each room cell that could be captured individually by the scanner became one more component that completes the virtual model and optimizes it. In the work process, the proximity to the surfaces of the building is created, whose geometric properties also challenge a scientific interpretation of the building form in the building process on the historical site. Working on the current state of a building is therefore always more than just a description of the current building fabric: it is a basic prerequisite for the scientific investigation of the history of the building. The objectification of the building fabric in a reference space of the digital model makes it possible to feed an artificial field of experimentation for the scientific investigations with the verified data of the scanned building documentation. The building reveals like a document of the time the signification of the itself for whom can read the data.

The question arises as to how historical building research is to be evaluated in both cases, what historical value a scanned digital model can have on the one hand and what scientific value a reconstruction of a building recreated and based on historical techniques can have on the other. Which case is a reference for scientific work? Has



cio: i danni strutturali nascosti, i movimenti delle gru sulle coperture, la visibilità degli interventi edilizi, la statica degli elementi costruttivi riferibili alle diverse fasi edilizie della Cattedrale, che si compone oggi non solo di un nucleo carolingio ma di molti edifici che sono stati aggiunti alla Cappella Palatina di Carlo Magno nel corso di oltre milleducento anni di storia costruttiva.

La definizione di tutte le dimensioni dell'edificio, vale a dire l'accuratezza con cui tutte le parti possono essere misurate sia nel modello virtuale sia nella realtà, non è solo legata al buon funzionamento dello scanner ma soprattutto al lavoro del team di rilevamento, che è riuscito a riunire le singole scansioni in un modello completo. Ogni zona acquisita singolarmente dallo scanner è entrata a far parte del modello virtuale completo e lo ottimizza. È stato ricreato un rapporto ravvicinato con le superfici dell'edificio, le cui proprietà geometriche pongono anche una sfida nell'interpretazione scientifica della sua forma in relazione al processo costruttivo. Lavorare sullo stato attuale di un edificio è quindi sempre più di una semplice descrizione della struttura presente: è un presupposto fondamentale per l'indagine scientifica della sua storia. L'oggettivazione della fabbrica nello spazio di riferimento del modello digitale consente di alimentare un ambito artificiale di sperimentazione funzionale a indagini scientifiche basate sui dati verificati della documentazione tridimensionale acquisita. Alla pari di un documento storico, l'edificio

rivela il suo vero significato a chi è in grado di interpretare i dati.

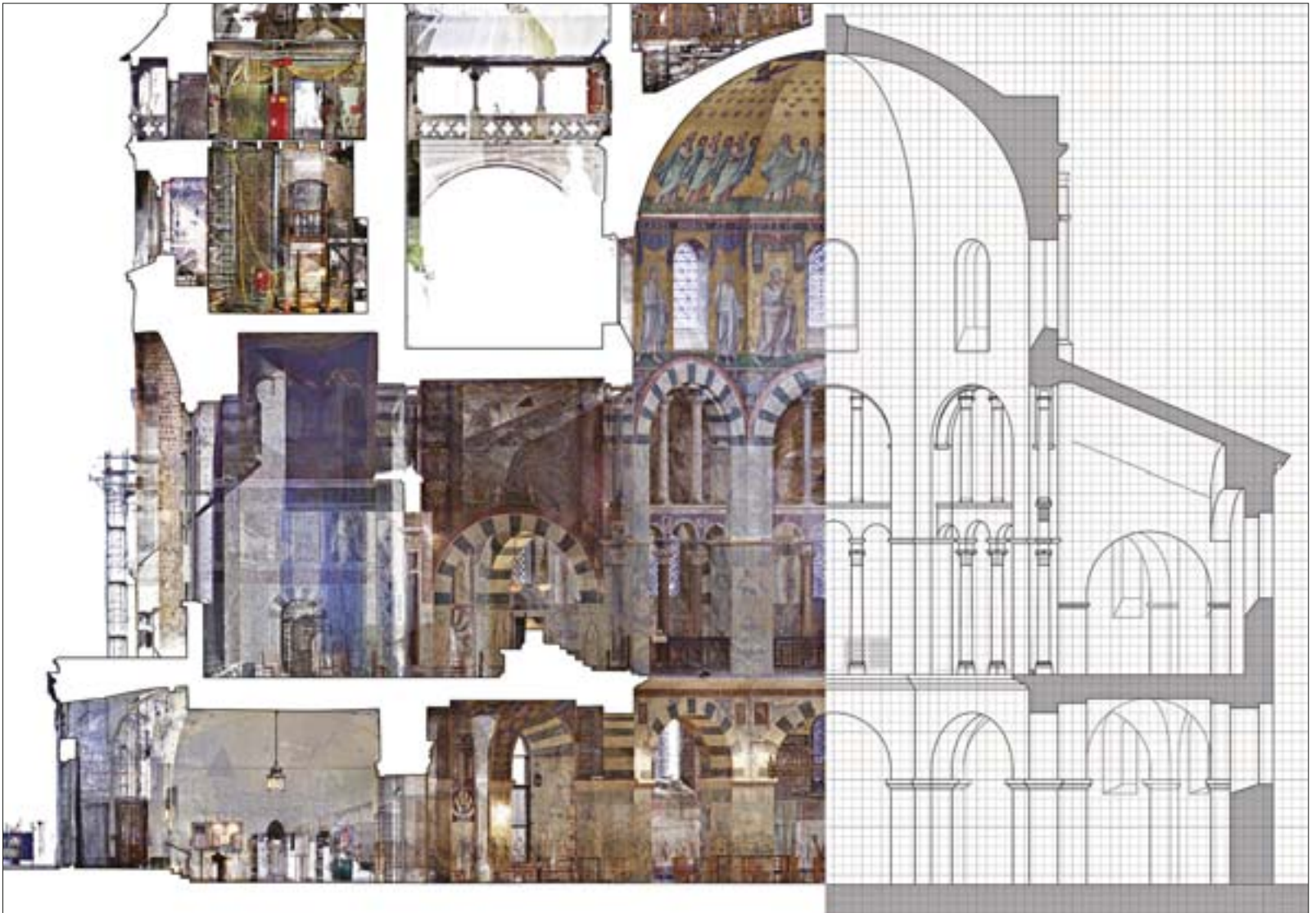
Allora la domanda relativa alla valutazione della ricerca sugli edifici storici assume un duplice aspetto: ci si interroga da una parte, sul piano storico, sul valore di un modello digitale realizzato a partire da un'acquisizione tramite scanner laser, dall'altra, sul piano scientifico, sul valore scientifico di una ricostruzione basata sulle metodologie della ricerca storica. Quale tra i due strumenti rappresenta un reale riferimento per il lavoro scientifico? La componente emotiva e la soggettività della ricerca storica hanno un valore comparabile con quello dei dati oggettivi dell'edificio rilevato? Per essere più precisi, la corrispondenza tra l'idea di edificio ricostruito con tutte le operazioni di scansione risulta scientificamente provata?

Chi si pone in quest'ottica, può consultare la ricerca presentata nella nostra pubblicazione del 2017 [Pieper, Schindler 2017] e riconoscere la totale corrispondenza (fig. 4) tra quanto presentato e le nuvole di punti ottenute tramite la scansione puramente quantitativa eseguita dalla Sapienza Università di Roma nel 2023 [Pritchard et al. 2023]. L'idea costruttiva della Cappella Palatina e la nuvola di punti sono due descrizioni molto diverse della stessa realtà dell'edificio di Aachen [Pritchard 2023]: la bellezza visiva della nuvola di punti e l'unitarietà concettuale delle dimensioni e della geometria delle forme.

L'edificio nel suo contesto storico

La Cappella Palatina di Carlo Magno ad Aachen rimase per lungo tempo dopo la sua costruzione uno dei più grandi e spettacolari edifici a nord delle Alpi: una volta a cupola alta oltre 30 metri venne eretta su uno spazio centrale ottagonale, con una campata di quasi 15 metri. Qui, dall'alto delle gallerie che circondavano lo spazio, il sovrano Carlo Magno e la sua corte seguivano le messe sacre (fig. 5). In Europa non si è mai spenta la memoria di questa corte, che per circa venti anni dopo l'incoronazione dell'imperatore, avvenuta nell'800, ha trovato sede ad Aachen. Non sorprende che l'edificio sia stato il primo monumento in Germania a essere inserito nella lista del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO nel 1969.

4/ Sezione della Cappella Palatina. A sinistra: scansione della parte occidentale (Sapienza Università di Roma); a destra: ricostruzione sulla griglia del pes agrimensorum (cm 35,37) (elaborazione di Bruno Schindler).
Section of the Palatine Chapel. Left: modern scan of the western part (Sapienza University of Rome); right: reconstruction of the original plan with the grid of pes agrimensorum (35.37 cm) (by Bruno Schindler).



L'edificio centrale della Cattedrale, unitamente ad altri resti di strutture del palazzo imperiale, rappresenta il patrimonio architettonico di epoca carolingia più esteso che ci è rimasto. Le successive aggiunte di numerose cappelle che circondano l'edificio testimoniano il continuo impegno dei successori di Carlo Magno per proteggere il nucleo strutturale di questa chiesa, luogo simbolico di fondazione del potere imperiale. Le incoronazioni dei re tedeschi che si tenevano ad Aachen e i pellegrinaggi regolari alle leggendarie reliquie bibliche che si dice Carlo Magno avesse ricevuto in dono direttamente da Gerusalemme, hanno legato

saldamente questa chiesa alla storia europea fino alla dissoluzione del Sacro Romano Impero germanico nel 1802. Anche in seguito, sotto il dominio francese prima e prussiano in seguito, l'Impero e l'edificio della Cappella Palatina furono utilizzati per l'auto-promozione politica dei governanti. Allargando gli orizzonti, si può dire che ciò ha portato all'idea della moderna unificazione dell'Europa, e nel 1964 ha trovato il suo culmine in una mostra internazionale sulla figura di Carlo Magno [Braunfels 1965; Braunfels 1968].

Più rilevante per la storia della Cattedrale è il valore del nucleo dell'edificio ancora esistente

the emotional part and subjective quality of historical practice just a comparable value as objectively scanned sparse building data? To be more precise, is the unity of the reconstructed building idea and the scanned building findings scientifically proven?

Anyone who follows this axiom will be able to lecture the research done in our book publication in 2017 [Pieper, Schindler 2017] and see the complete compliance (fig. 4) with the point clouds based on the purely quantitative scan by Sapienza University of Rome in 2023 [Pritchard et al. 2023]. The building idea of the Palatine Chapel and the points cloud

5/ Interno della Cappella Palatina (foto di Bruno Schindler).

Interior of the Palatine Chapel (photo by Bruno Schindler).

6/ Interno della Cappella Palatina prima degli interventi del 1902 (Albrecht Haupt, *Monumenta Germaniae Architectonica*, Leipzig 1913, tav. 5).

*Inside the Palatine Chapel before the renovation in 1902 (Albrecht Haupt, *Monumenta Germaniae Architectonica*, Leipzig 1913, tav. 5).*

scan are both two very different descriptions of the same reality of the building in Aachen [Pritchard 2023]: the visual beauty of the points cloud and the conceptual unity of dimensions and geometry of shapes.

The building in its historical context

Charlemagne's Palatine Chapel in Aachen remained one of the largest and most spectacular buildings north of the Alps for a long time after its construction: a domed vault over 30 meters high was erected over an octagonal central space with a span of almost 15 meters, into which the ruler, Charlemagne, and his court followed the holy masses looking down from towering galleries all around (fig. 5). The memory of the permanent court in Aachen, which lasted for around 20 years around the emperor's coronation in 800, has never died out in Europe. It was not surprising that the building was the first monument in Germany to be introduced on the UNESCO World Heritage List in 1969.

The central core building of Aachen Cathedral, together with other structural remains of the imperial palace in Aachen, provides the most extensive building heritage that has survived from Carolingian times. The later additions of numerous chapels that surround the building today bear witness to the constant efforts of Charlemagne's successors to protect this church in the structural center as a symbolic founding place of imperial rule north of the Alps. The coronations of the German kings held in Aachen and the regular pilgrimages to the legendary biblical relics, which Emperor Charlemagne is said to have received directly from Jerusalem, firmly anchored the church building in European history until the dissolution of the Holy Roman Empire of the German Nation in 1802. Even later, under the French and later under the Prussian rule, the emperorship and its Palatine Chapel building were appropriated for political self-promotion of the rulers. In extension it led to the idea of modern European unification and in 1964 it culminates in an International Charlemagne Exhibition [Braunfels 1965; Braunfels 1968].

More important for the history of Aachen Cathedral is the value of the original core



in situ, tuttora ampiamente preservato nell'area dell'antico palazzo e in particolare nella Cappella Palatina [Krücken et al. 2016]. Tuttavia, va sottolineato che molti degli elementi



oggi visibili di quest'ultima sono spesso solo trasformazioni o rifacimenti di quelli originali. Intorno al 1902, all'interno della Cappella furono realizzati mosaici e rivestimenti marmorei nello stile dell'architettura bizantina per coprire le pulite superfici dell'edificio carolingio: durante questo processo alcuni importanti angoli di pilastri e in particolare gli archi originali dell'ottagono centrale furono distrutti per sempre con martello e scalpello (fig. 6) [Strzygowski 1904]. L'interno magnificamente decorato, che è frutto di questo rifacimento, mostra più i tratti di un interno in stile *Art Nouveau* che di una ricostruzione scientifica dello spazio in linea con lo spirito degli architetti di Carlo Magno! [Konnegen 2011].

Ad Aachen lo storico dell'architettura deve ricorrere alle metodologie della ricerca scientifica per un esame critico dello stato attuale della costruzione [Maintz 2012]. Lo sviluppo delle metodologie di rilievo digitale e, in particolare, l'analisi complessiva delle scansioni delle superfici visibili, forniscono nuove importanti informazioni sulla realizzazione del manufatto carolingio, se nel modello digitale vengono identificate le trasformazioni successive.

L'idea architettonica, le linee di forza e la geometria del sistema costruttivo

La Cappella Palatina di Aachen è uno di quegli edifici in cui l'organizzazione architettonica degli spazi risulta immediatamente chiara all'osservatore (fig. 5). Un ampio ambiente centrale svetta in altezza dominando l'intero edificio; otto archi simmetrici si aprono su un basso ambulacro nella parte inferiore e su una galleria nella parte superiore [Heckner, Beckmann 2012]. L'ingresso avviene attraverso un vestibolo a ovest che conduce direttamente nella sala centrale attraverso l'ambulacro. All'altra estremità, a est, il deambulatorio inferiore ospita l'altare dedicato a Maria. Ai lati del vestibolo vi sono scale a chiocciola che conducono alla galleria che nella parte occidentale ospita il trono di Carlo Magno. La galleria superiore si affaccia sulla sala centrale con otto aperture ad arco: qui una serie di colonne con funzione decorativa sembra delimitare lo spazio ottagonale centrale [Alcuinus, *Epistulae* 1777]. Queste colonne non hanno funzione statica ma vanno a ricreare un colonnato regolare nello stile de-

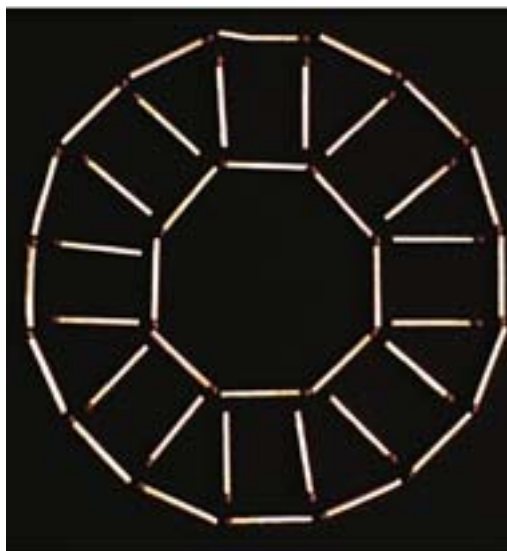
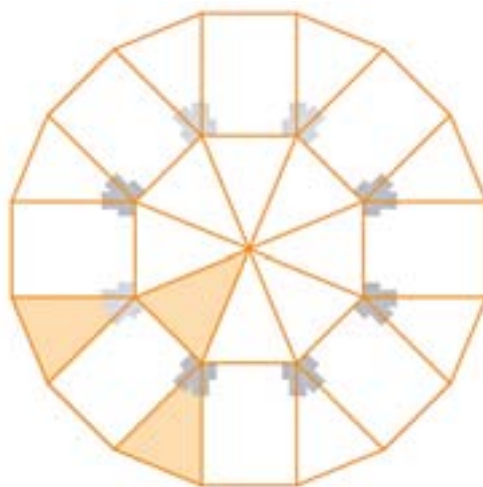
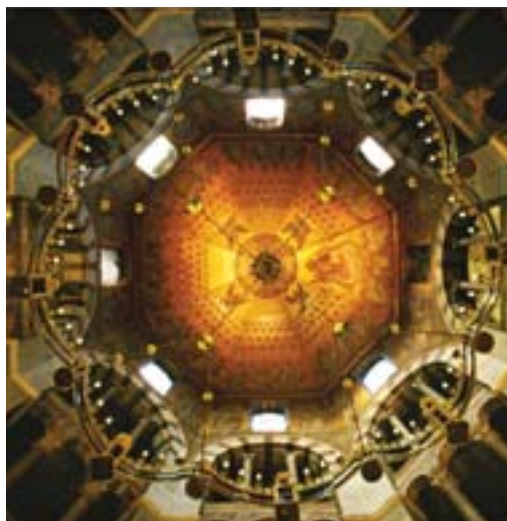
7/ Geometria delle linee di forza (elaborazione di Bruno Schindler).

Geometry of the lines of force (by Bruno Schindler).

gli antichi *martyria*, nascondendo alla vista ciò che accade oltre, nel corridoio della galleria.

In alto, un tamburo sostiene una cupola ottagonale che già al tempo di Carlo Magno era decorata con un mosaico simile a quello attuale, che raffigura i 24 anziani dell'Apocalisse al cospetto del Redentore [Wehling 1995]. La sala ottagonale centrale ricorda la chiesa bizantina di San Vitale edificata a Ravenna circa duecentocinquanta anni prima. Tuttavia la differenza tra i due edifici sta nel fatto che ad Aachen l'ottagono domina l'intero spazio, dal pavimento fino alla sommità della cupola, mentre a Ravenna si trasforma, in corrispondenza dell'imposta della cupola, in un cerchio [Ley 2014]. Ad Aachen la massiccia muratura della cupola a volta poggia sulla sommità del tamburo ottagonale, rinforzato a tale scopo con tre ancoraggi rettilinei ciascuno realizzato da otto tiranti forgiati. Le otto superfici a botte chiudono lo spazio in corrispondenza delle otto diagonali dell'ottagono. I tiranti dell'anello assorbono dunque le spinte della cupola. In questo modo è il suo solo peso a essere scaricato sulla muratura verticale del tamburo. Quest'ultimo si appoggia a sua volta sugli otto archi delle gallerie superiori, che generano altre forze di spinta verso l'esterno in corrispondenza dei pilastri angolari dell'ottagono. Queste sollecitazioni di circa 40 tonnellate vengono scaricate sulle coppie di muri alle spalle di ogni pilastro (circa 20 tonnellate ciascuno) [Gerhardt, Kurrer, Pichler 2003] e poi ancora più verso il basso, fino alle fondamenta dell'edificio in corrispondenza della galleria.

Le coppie di muri alle spalle degli otto vertici dell'ottagono vanno dunque a creare il perimetro murario esterno a sedici lati della Cappella Palatina. Anche qui, tiranti rettilinei montati ad anello contrastano tutte le forze provenienti dalla volta, garantendo così la stabilità della struttura. Gli elementi portanti formano uno schema concentrico costituito da due anelli di tensione, un ottagonale e un esadecagone collegati mediante muri convergenti verso il centro. Questi, sfruttando la resistenza a compressione della muratura, contrastano la spinta radiale: il diagramma statico mostra il raddoppio del poligono centrale da otto a sedici lati. Lo schema del passaggio da un esagono a un esadodecagone attraverso quadrati e triangoli



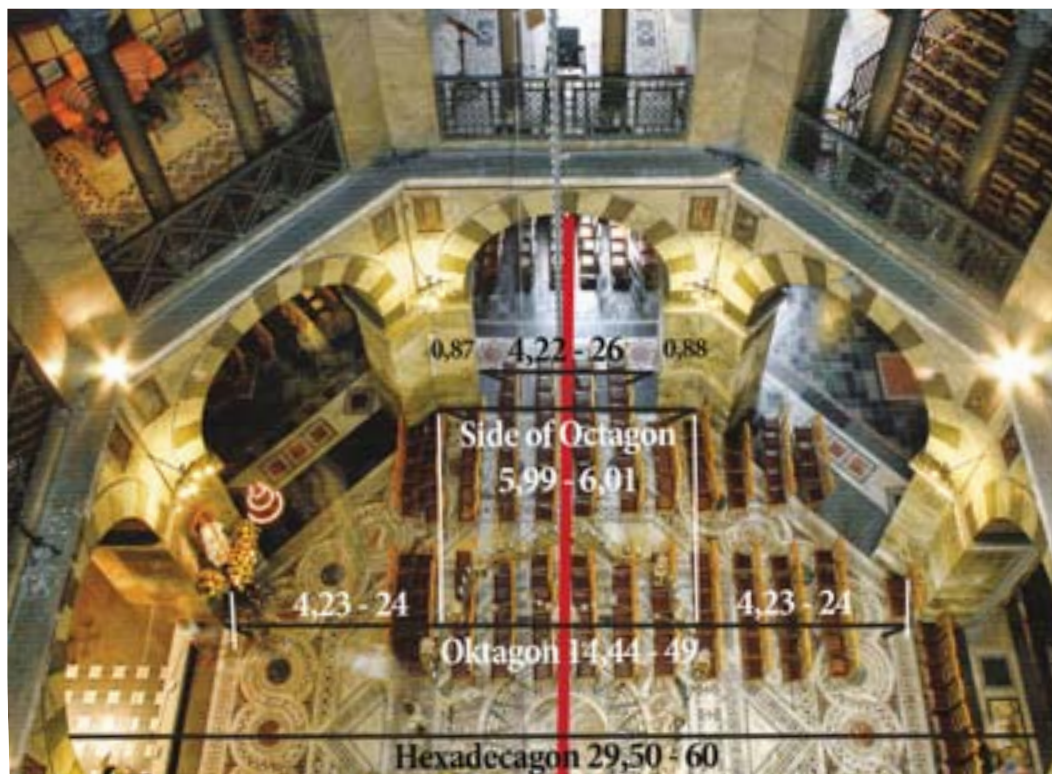
building stock still existing in situ, which has been richly preserved to this day in the area of the old palace and especially in the Palatine Chapel [Krücken et al. 2016]. Nevertheless, it must be emphasized directly here that many components of the Palatine Chapel that are visible today are often only transformations or vaguely remakes from their times. Inside, mosaics and marble cladding in the style of Byzantine architecture were introduced around 1902 to cover up the plain surfaces of the Carolingian building fabric: in the process, some important pillar corners and in particular the original arches of the central octagon were invasively destroyed forever with hammer and chisel (fig. 6) [Strzygowski 1904]. Today, the magnificently decorated interior of Aachen Cathedral emerging from this remake thus shows more the traits of a historicizing Art Nouveau interior than a scientific reconstruction of the spatial idea in the spirit of Charlemagne's master builders! [Konnegen 2011]. The architectural historian must use in Aachen the methods of building research with the aim of critically examination of the current condition of the building fabric [Maintz 2012]. The development of digital surveying methods, in particular the uniform evaluation of laser scans of the visible surfaces provides important new insights into the building fabric of the Carolingian center, if the impact of later transformations is included to the digital surveying model.

The building idea, the lines of forces and the geometry of the central building system

The Palatine Chapel in Aachen is one of those buildings whose architectural spatial structure is immediately apparent to the observer (fig. 5). A wide and high central space dominates the entire building, whose eight symmetrical arcades radiate into a low lateral circumambulatory below and galleries above [Heckner, Beckmann 2012]. The entrance is in the west through a vestibule and through the ambulatory bay directly into the central room. At the other end, in the east, the lower ambulatory bay houses the altar dedicated to Mary. Spiral staircases at the sides of the vestibule are giving access to the galleries, which lead visitors to the western bay, where the throne of Charlemagne still stands

10/ Misure dell'ottagono in metri (elaborazione di Bruno Schindler).

The metric dimensions of the octagon (by Bruno Schindler).



University. L'obiettivo di questo rilievo era quello di trovare tracce delle murature originarie oltre il rivestimento in marmo direttamente nella parte centrale, sotto l'imposta delle otto arcate inferiori; questi elementi non erano mai stati misurati in precedenza. Lo studio dell'edificio si era sempre basato su una misurazione manuale eseguita nel 1900 dal precedente capomastro della cattedrale, Joseph Buchkremer, prima delle trasformazioni del 1902.

I risultati di questo nuovo rilievo non si discostavano significativamente dalle misurazioni presenti nei disegni di Buchkremer [Buchkremer 1955]. Tuttavia la nuova misurazione ha incluso tutti gli elementi dell'interno, l'ottagono fino alla sommità della volta e tutti i pilastri e le arcate della galleria che gira intorno all'ottagono centrale. All'epoca le misurazioni erano ancora eseguite con teodoliti meccanici di alta precisione dotati di goniometri analogici. Abbiamo utilizzato dunque il metodo dell'intersezione in avanti utilizzando due strumenti contemporaneamente e un puntatore laser ottico (fig. 9). I risultati delle misurazioni venivano calcolati immediatamente e

validati in tempo reale con un software appositamente predisposto: i dati forniti dai due strumenti erano controllati verificando che la deviazione massima tra le distanze fosse inferiore ai 5 millimetri. L'osservazione e le misurazioni venivano eventualmente ripetute fino al raggiungimento dell'accuratezza stabilita. La nuvola 3D di allora comprendeva circa 480 punti, la maggior parte dei quali erano stati misurati due volte e quindi da quattro posizioni per ciascun punto. Il riversamento dei dati nel software CAD ha mostrato che l'ottagono originale ha un diametro di 14,44 m alla base e di 14,50 m alla sommità del tamburo, escludendo il rivestimento moderno in marmo (fig. 10). I lati dell'ottagono, che sottendono gli angoli del poligono di 135° di ampiezza, non risultano esattamente uguali, e la loro misura varia tra 5,94 m e 6,02 m. I pilastri ad angolo a sinistra e a destra delle aperture degli archi misurano da 0,87 m a 0,90 m, mentre la luce degli archi varia da 4,21 m a 4,23 m, ad eccezione di quello a nord, che misura 4,25 m. Solo per i pilastri dell'ottagono e dell'ambulacro siamo stati in grado di rilevare e misurare gli

a concentric scheme consisting of two tension rings, an octagon and a hexadecagon connected with concentric walls. They counteract with the compression resistance of the masonry the radial thrust: the static diagram shows the doubling of a central polygon from eight to sixteen. The scheme is immediately understandable to everyone for the transition of a hexagon to a hexadodecagon with squares and equilateral triangles. For the polygonal doubling of the octagon to sixteen sides, the characteristic triangle is from the octagon and we find it symmetrically behind the corners of the polygon in order to achieve the same dimension for all sides of the outer and inner polygon (fig. 7) [Schindler et al. 2005].

In fact, whole numbers can also be given for all the lengths of the sides for this scheme if the octagon side is given as 20 and the octagon diameter as 48. The diagonal then gives 52 and thus the diameter of the hexadecagon $48 + 52 = 100$, around five times the side size. These geometric relationships result directly from the general statics of the building space. The proportions are due to the right-angled triangle 10/12/13, which with sufficient precision gives the 22.5° angle for the octagon and the dimension 100 for the outer hexadecagon (fig. 8).

Measurement of the original building fabric and the 'pes romanus capitolinus'

The actual dimensions of the Palatine Chapel were known since an initial surveying campaign by the Chair of Building History at RWTH Aachen University in 2002. The aim of this survey was to find traces of the original walls behind the marble cladding directly under the impost profiles of the eight lower arcades in the center. Never these components had been measured before. Building research had always relied on a hand measurement by the former cathedral master builder Joseph Buchkremer, he did in 1900 before the transformations of 1902. The results of the new survey were not significantly different from the individual measurements in Buchkremer's sketches [Buchkremer 1955]. Nevertheless, the new measurement included all the components of the interior, the octagon up to the summit of the vault and all the pillars and arcades one can find in the gallery around the central

11/ Misure dell'ottagono in piedi (elaborazione di Bruno Schindler).
The feet dimensions of the octagon (by Bruno Schindler).

octagon. At that time, measurements were still taken with some high precision but mechanical theodolites with analog circular graduations. We used two devices simultaneously and an optical laser pointer for the incision method (fig. 9). The measurement results were immediately calculated and evaluated for accuracy by a specially programmed software: the bearings of both devices were checked for the shortest distance of deviations, which had to be below the 5-millimeter mark. Observation and measurement were repeated until the required accuracy was achieved. The points cloud comprised in those days around 480 points, most of which were measured twice and thus measured from a total of four positions. The evaluation in the CAD program resulted in the original octagon the original diameter without modern marble cladding of 14.44 meters at the bottom to 14.50 meters at the top of the tambour (fig. 10). The octagon sides between the 135° polygon angles yielded a somewhat vague measurement of between 5.94 and 6.02 meters. The corner pillars to the left and right of the arch openings measure 0.87 to 0.90 meters, the arch openings open 4.21 to 4.23 meters, except the north one with 4.25 meters. Only for the pillars in the octagon and in the ambulatory we were able to detect and measure the traces of the original stone edges behind the modern marble. It was only there, that we were able to determine a repeating precision of the architecture. The walls of the surrounding hexadecagonal ambulatory were built much less precisely, with deviations of up to 0.20 meters. Only the precision of the inner diameter of the whole round church (29.48 to 29.60 meters) matches the precision of the octagon in the middle: it is exactly 100 roman pedes capitolini (29.48 - 29.60 cm).

Analysis in *pes romanus* of the original construction dimensions and their distribution in the building

Using the unit of measurement *pes capitolinus* (pr), the octagon diameter could be reconstructed as exactly 49 pr, even though the interior of the octagon widens slightly towards the top (up to 49.2 pr), as is usual under stone vaults with outward thrust. There is a deviation from SW to NE with +6 cm.

spigoli originali della pietra dietro il marmo moderno. Solo in questo caso siamo riusciti dunque a mettere in luce la precisione dell'architettura attraverso un metodo accurato e ricorsivo. I muri dell'ambulacro esadecagonale esterno sono stati realizzati con una accuratezza molto minore, con deviazioni che arrivano a 0,20 m. Solo il diametro interno della chiesa (29,48-29,60 m) corrisponde alla precisione dell'ottagono centrale: è esattamente 100 *pedes capitolini* romani (1 *pes* = 29,48-29,60 cm).

Analisi in *pes romanus* delle dimensioni originali e della loro distribuzione nell'edificio

Utilizzando l'unità di misura del *pes capitolinus* (pr), la larghezza dell'ottagono è stata ricostruita come pari esattamente a 49 pr, anche se all'interno questo si allarga leggermente verso l'alto (fino a 49,2 pr), come spesso accade a causa della spinta verso l'esterno delle volte in pietra. C'è una deviazione da sud-ovest a nord-est di +6 cm. Le facce dei pilastri angolari misurano, con una certa imprecisione, 3 pr. Il lato dell'ottagono è di 20,3 pr e pertanto la luce dell'arco corrispondente è di 14,3 pr (fig. 11). La misura dell'ottagono centrale è più precisa di quanto riscontrato per i singoli lati del poligono nella misurazione degli archi e dei pilastri: ciò fa pensare che, quando sono state eseguite le misurazioni per il tracciamento

dell'edificio, l'ottagono sia stato misurato con grande precisione e che gli archi siano stati posizionati solo in un secondo momento. Gli archi sono distribuiti in modo che quelli di luce maggiore vengono a trovarsi in corrispondenza degli assi principali est-ovest e nord-sud. L'arco a est, che ha una luce di 14,35 pr, è più ampio di quello a ovest, mentre il più ampio risulta essere quello a nord, la cui luce è pari a 14,4 pr. Evidentemente, la misura dei lati del poligono non necessitava, in origine, di grande precisione. Anche le dimensioni dei pilastri d'angolo risultano meno esatte, e possono essere ricondotte con una certa approssimazione a 3 pr (2,9-3,1 pr). La luce dei singoli archi, invece, è stata misurata con maggiore cura dal centro di ogni lato del poligono. Essendo tale ampiezza misurabile in 14,3-14,4 pr, rimanevano esattamente 3 pr per i pilastri d'angolo a destra e a sinistra, misura che non sempre risulta verificata. Per tutte le dimensioni, si nota che una suddivisione decimale del *pes romanus capitolinus* corrisponde molto accuratamente alle deviazioni dalle misure intere [Chouquer, Favory 2001]. Questa insolita partizione del piede in decimi ($pr/10 = 2,95$ cm) costituiva tuttavia la consueta unità di misura del *pede de St. Hubert* fin dalla fondazione carolingia della città di Liegi, sulla Mosa, nell'VIII secolo ad opera del bisnonno di Carlo Magno, Pipino il Vecchio [Thomassin 1802]. La città si trova



in Belgio, 40 km a ovest di Aachen. Non lontano da lì, a meno di un'ora a piedi verso valle, si trova Herstal, il palazzo di "famiglia" della dinastia carolingia, dove il piccolo Carlo trascorse la sua infanzia.

La sequenza delle misure dell'ottagono teoricamente esatta

Il fatto di poter ritrovare, oltre il rivestimento in marmo, dimensioni misurabili in *pes romanus capitolinus*, lascia pensare di poter ricostruire anche quelle perdute nelle trasformazioni del 1905 sulla base della successione di misure accertate come esistenti al tempo: mediante aggiunte e sottrazioni, dalle dimensioni che abbiamo verificato essere originali si ottengono dimensioni altrettanto esatte.

Aggiungendo alla misura dello spazio interno all'ottagono centrale (49 pr) gli spessori dei due muri da 3,5 pr si ottiene una misura pari a 56 pr, misura che si confronta con quella della muratura esterna della chiesa, definita dal poligono a 16 lati (100 pr). La differenza (44 pr) deriva dai 22 pr della profondità delle campate della galleria inferiore, profondità che diventa di 22,5 pr nel caso della galleria al primo piano, a causa del diverso spessore del muro al livello superiore, pari a 3 pr. Se dalla dimensione dell'ampiezza dello spazio centrale (49 pr) andiamo a sottrarre la misura del lato (20,3 pr) otteniamo un valore di 28,7 pr che, diviso per due, fornisce un valore di 14,35 pr per la proiezione dei ciascuno dei lati inclinati dell'ottagono. La geometria dell'ottagono dovrebbe essere qui definita numericamente con la formula $\sqrt{2} = 20,3 \text{ pr} : 14,35 \text{ pr} = 1,414$.

Da quanto detto appare evidente che la luce degli otto archi che si trovano al centro di ogni lato dell'ottagono e che misura 14,3 pr (con un errore quindi pari a 1,5 cm) è stata pensata esattamente uguale a quei segmenti di 14,35 pr, proiezioni dei lati inclinati dell'ottagono, e che quindi il diametro della circonferenza inscritta nell'ottagono stesso non è altro che la somma di una serie di misure: $49 \text{ pr} = 14,33 + 3 + 14,33 + 3 + 14,33 \text{ pr}$.

Al centro di questa sequenza si trova il lato dell'ottagono, nell'ipotesi che a ogni pilastro fosse attribuita una dimensione di 3 pr: $20,33 \text{ pr} = 3 + 14,33 + 3 \text{ pr}$.

È evidente che l'apertura voltata che insiste sul lato del poligono determina con estrema precisione le proporzioni degli archi. È significativo che durante le indagini archeologiche sugli spiccati delle fondazioni siano state trovate incisioni per un'apertura voltata, poi non utilizzata, esattamente di 14 pr (fig. 12) [Schaub 2011]. Questo ritrovamento ci fa ipotizzare che, prima di avviare la costruzione, i progettisti abbiano effettuato indagini preliminari in base alle quali, dopo un attento esame, fu infine costruito con precisione un arco di quasi 14,35 pr al centro dei lati di 20,3 pr, dell'ottagono con conseguenti pilastri di 2,975 pr anziché 3 pr (3 pr = 87,7 cm, valore medio delle dimensioni di tutti i pilastri, come osservato da Buchkremer).

Metodo moderno di analisi delle dimensioni dell'ottagono, regola storica della $\sqrt{2}$

Si vuole qui evidenziare il fatto che le dimensioni dell'ottagono della Cappella Palatina di Aachen possono essere completamente definite fino a 1/10 pr (o 1/20 pr) per ciò che riguarda la geometria del poligono: si tratta di un calcolo che regge all'analisi scientifico-matematica moderna di $\sqrt{2}$ utilizzando l'algoritmo di Euclide [Euclide VII - 2].

Le due dimensioni necessarie per la costruzione dell'ottagono, quelle del lato del quadrato circoscritto e del lato dell'ottagono stesso, danno luogo a un rapporto irrazionale (fig. 13): $(\sqrt{2} + 1)/1 = 2 + \text{resto}$, (a) = $(\sqrt{2} - 1)$, il resto (a) equivale a 0,414... e $1/(\sqrt{2} - 1) = 2 + \text{resto}$, (a+1) = $(3 - 2\sqrt{2})$, il resto (a+1) equivale a 0,172... e in generale $\text{resto}(n) / \text{resto}(n+1) = 2 + \text{resto}(n+2) \dots$

Questa successione di calcoli deriva sempre dal quoziente 2 e dal decrescente resto successivo: il resto che sempre si produce, per quanto piccolo, fa sì che $\sqrt{2}$ sia un valore irrazionale perché non raggiunge mai lo 0. Questa proprietà irrazionale di $\sqrt{2}$ nella geometria dell'ottagono può essere verificata con grande precisione anche mediante approssimazioni razionali, come le dimensioni di 49,0 pr e di 20,3 pr ridotte di un fattore 7, cioè considerando $7 \times 7,0 \text{ pr} / 7 \times 2,9 \text{ pr}$, che possiamo an-

The corner pillars are measured somewhat inaccurately at 3 pr. The polygon side of the octagon is at 20.3 pr and thus the derived arch openings 14.3 pr (fig. 11). The central octagon is more precise than the subdivisions of the polygon sides with pillars and arches: when measuring on the historical building site, the octagon was apparently first determined very precisely and only then, in a second step, the varying arch openings were determined. These different arch openings are distributed with larger spans on the main axes in an east-westerly and north-south direction. At 14.35 pr, the arch in the east is larger than the arch in the west. At 14.4 pr, the northern arch exceeds all others. The measurements for the polygon sides apparently was initially not very necessary. Even the dimensions of the corner pillars are less precise, which today can only be reconstructed very imprecisely at 3 pr (2.9 to 3.1 pr). Instead, the arch openings were apparently measured carefully from the center of each side of the polygon at 14.3 to 14.4 pr, on the assumption that exactly 3 pr would remain for the rest, left and right for the corners of the pillars, which was not always the case.

For all measurements, it is always noticeable that a decimal subdivision of the pes capitolinus describes the deviations from the whole foot measurements very precisely [Chouquer, Favory 2001]. This unusual division of foot into tenths (= 2.95 cm) was the usual unit of measurement of the pied de St. Hubert since the Carolingian foundation of the city of Liège on the Meuse in the 8th century by Charlemagne's great-grandfather Pippin the Older [Thomassin 1802]. Not far from there, less than an hour's walk downstream, lies Herstal, the Carolingian family palace, where little Charle spent his childhood (Belgium, 40 Km west from Aachen).

The theoretically exact measure sequences of the octagon

It is clear that with all the building dimensions still found behind the marble cladding in roman pes capitolinus, the attempt should also succeed in reconstructing the dimensions lost in the 1905 transformations with the help of the once real existing measure sequences: sums and differences of secured exact original dimensions

12/ Incisioni nello spiccatto di fondazione (foto di Bruno Schindler; autorizzazione Dombauamt 2012).
Incisions in the foundation crown (photo by Bruno Schindler; authorization 2012 of Dombauamt).

result in comparably exact dimensions. The span of the octagon (49 pr) and additionally the wall sections (3.5 pr) result in an extension of the central octagon to 56 pr that has place in the center of the outer sixteen-sided outer wall circle (100 pr) of the church. The difference (44 pr) results in 22 pr for the depth of the bays of the lower gallery and 22.5 pr for the upper gallery because of the top wall of 3 pr.

In the central octagon, the difference between the span (49 pr) of the central church space and the dimension of the octagon side (20.3 pr) is 28.7 pr and its halving is 14.35 pr for the laterally slanted sides in the octagon. The geometry of the octagon should be numbered here with

$$\sqrt{2} = 20.3 \text{ pr} : 14.35 \text{ pr} = 1.414.$$

When considering this, it is noticeable that the eight arch openings in the centers of the polygon sides with 14.3 pr (except for 1.5 cm) were measured exactly the same as the 14.35 pr slanted sides of the octagon and the diameter of the octagon is actually only the sum of a measure sequence:

$$49 \text{ pr} = 14.33 + 3 + 14.33 + 3 + 14.33 \text{ pr}.$$

In the center of this measure sequence is the octagon's side, with the premise that each pillar was granted 3 pr:

$$20.33 \text{ pr} = 3 + 14.33 + 3 \text{ pr}.$$

It is obvious that the arch opening in the polygon side very sensitively determines the proportions of the arches. It is significant that during archaeological probing on the foundation crowns, carvings for a deviating arch opening of exactly 14 pr were found (fig. 12) [Schaub 2011]. The find proves that we must assume preparatory investigations by the planning builders before they started with construction, according to which, after careful examination, an arch of quasi 14.35 pr was finally built very precisely in the middle of the octagon sides of 20.3 pr, resulting in pillars of 2.975 pr instead of 3 pr (= 87.7 cm, the statistical average of all pillars as seen by Buchkremer).

Modern method of analyzing the dimensions of the octagon, historical rule for $\sqrt{2}$

We would like to point out here that the dimensions of the octagon of the Aachen

che tradurre in decimi di pr come 70/29:
 $70 : 29 = 2$ e resto 12

$$29 : 12 = 2$$
 e resto 5

$$12 : 5 = 2$$
 e resto 2

$$5 : 2 = 2$$
 e resto 1,

e così via, fino all'ovvio prodotto del valore razionale di $2 : 1 = 2 + 0$ per questa successione di calcoli.

Applicato all'apertura ad arco, questo risultato diventa

$$(70 - 29) : 2 = 41 : 2 = 20,5$$

e quindi sette volte 143,5 decimi di pr, ovvero 14,35 pr. Questo determina un pilastro di 2,975 pr negli angoli, come illustrato sopra (29,48 cm per il pr e 14,445 m per il diametro medio della circonferenza inscritta nell'ottagono).

L'unica fonte storica antica che conosciamo riguardante il rapporto 70/29 (99/70 nella serie euclidea) è rappresentata da Erone di Alessandria [Svenshon 2008; Svenshon 2010]. Erone propose la seguente formula per il calcolo di $\sqrt{2}$:

$$(7 + 1/14) : 5 = (99/14) : (70/14),$$

cioè $\sqrt{2} = 99 : 70$ (= 1,414), [invece del meno preciso $\sqrt{2} = 7 : 5$, cioè $1,400 < \sqrt{2} = 1,414\dots$].

Da questo valore possiamo derivare direttamente: $(\sqrt{2} - 1) / 1 = (99 - 70) / 70 = 29 : 70$

e quindi la sequenza delle misure di 70 : 29 nell'ottagono [Pieper, Schindler 2017, pp. 206-211].

Il problema di salvaguardare la precisione delle dimensioni dell'edificio nel processo di costruzione

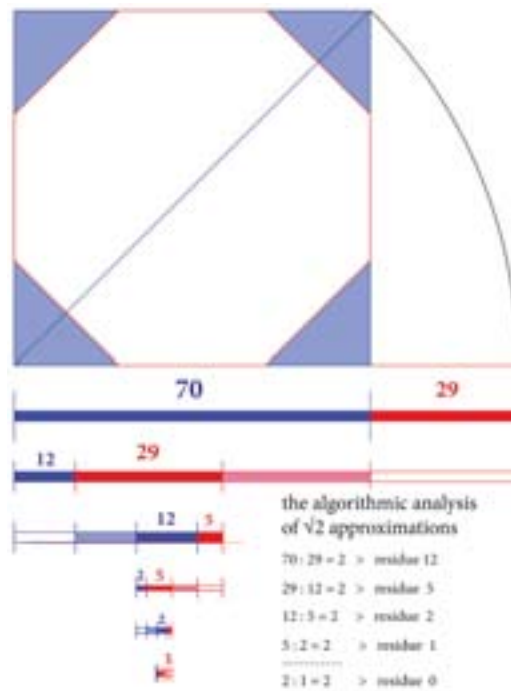
Come abbiamo specificato, la geometria alla base di tutte queste misure deriva dalle linee di forza dell'edificio, suggerendo un modello che sarebbe stato costruito a partire dal centro: la misura comune di 20 pr per il lato dell'esadecagono esterno con un diametro di 100 pr, per la circonferenza inscritta che va ad estendere quello dell'ottagono di 48 pr, con $48 = 14 + 3 + 14 + 3 + 14$, ovvero con una luce di 14 pr, come documentato archeologicamente per gli allineamenti degli archi incisi sullo spiccatto di fondazione (fig. 12). Ciò dimostra che il raddoppio del poligono in piedi interi era considerato puramente geometrico per la dimensione realizzata di 100 pr dell'esadecagono [Pieper, Schindler 2017, pp. 135-142]. Pertanto ci fu una verifica preliminare per i pilastri e gli archi dell'ottagono centrale. Tuttavia, le dimensioni dell'ottagono furono aumentate da 48 pr a 49 pr e, conseguentemente, il lato dell'ottagono da



20 pr a 20,3 pr, così come la luce dell'arco da 14 pr a 14,35 pr, utilizzando la sequenza di misure correlate a $\sqrt{2}$ che abbiamo già visto: $49 = 14,35 + 2,975 + 14,35 + 2,975 + 14,35$. Questa ulteriore operazione consentì ai mastri costruttori di distaccare leggermente la suddivisione interna dell'ottagono da quella dell'esadecagono esterno al fine di ottenere un miglior adeguamento alle proporzioni di $\sqrt{2}$ e di poter eseguire questo processo con estrema sensibilità e una precisione di 1/20 pr (1,5 cm) [Pieper, Schindler 2017, p. 143]. Durante i lavori di costruzione al centro dell'edificio della chiesa, dove si stavano effettuando lavori di scavo o venivano trasportati materiali pesanti per completare le fondazioni, sarebbe stato quasi impossibile proteggere i segni relativi alle misure. I punti di riferimento venivano quindi collocati in maniera più opportuna, al di fuori dell'area di costruzione, in modo che i dati di misurazione necessari potessero essere recuperati in qualsiasi momento dalle coordinate segnate all'esterno con picchetti, utilizzando occasionalmente corde tese al centro del cantiere. Ciò suggerisce la distribuzione altrimenti arbitraria di misurazioni esattamente ripetute nella struttura, in particolare il diametro dell'ottagono di 49 pr.

Ricostruzione della misurazione sul cantiere storico e il diagramma di misurazione

Il diagramma di misurazione corrispondente alle dimensioni dell'edificio¹ può essere ricostruito utilizzando due grandi quadrati con picchetti misurati con precisione su ogni lato (fig. 14) [Hyginus 800]. Nella nostra sperimentazione di misurazione del 2017, abbiamo testato con successo questo diagramma e il metodo associato per verificarne la praticabilità con una stadia di misurazione o canna di 12 pr (secondo Isidoro di Siviglia; cfr. Isidorus 1911). Inoltre, abbiamo segnato il risultato delle misurazioni con sabbia bianca per visualizzare la pianta risultante dall'applicazione di detto metodo (figg. 2, 3); il risultato è stato quello di un'immagine plausibile con dimensioni identiche a quelle dell'edificio originale. Partendo dal centro dell'edificio, entrambi gli assi principali erano allineati esattamente con i quattro punti cardinali. Il primo quadrato da



misurare era quello ruotato. Le semidiagonali di 84 pr furono misurate dal centro verso i vertici, cioè 7 x 12 pr della stadia di misurazione. I lati del quadrato misuravano circa 7 pr x 17 pr = 119 pr. I loro centri furono poi misurati dai quattro vertici, segnando ciascuno con 5 pr x 12 pr = 60 pr sempre leggermente oltre il centro per determinare il punto esatto tra le due misure. Era sufficiente interpolare l'insieme di questi centri per ottenere gli altri due assi dell'ottagono e determinare il secondo grande quadrato nello stesso modo. A questo punto, dall'intersezione dei due quadrati risultava un ottagono con lati pari esattamente a 49,2 pr (fig. 14)! Sui lati del quadrato, tuttavia, a partire dal loro punto medio, sono stati misurati solo 24,5 pr, cioè esattamente un segmento di 49 pr.

Dal momento che le sezioni trasversali dei picchetti di rilevamento erano esattamente 0,2 pr = 2/10 pr, con gli otto picchetti ai vertici del diagramma era possibile far sì che gli allineamenti delle corde si adattassero perfettamente all'ottagono dell'edificio! In particolare, questo è proprio uno dei risultati confermato dall'analisi della scansione effettuata dalla Sapienza Università di Roma. Gli step successivi della misurazione potevano quindi essere ese-

Palatine Chapel can be specified completely in 1/10 pr (or 1/20 pr) for the geometry of the polygon: It is a calculation that stands up to today's mathematically scientific analysis of $\sqrt{2}$ using Euclid's algorithm [Euclid VII - 2]. The two construction dimensions of the octagon, the diameter and the side, form an irrational ratio (fig. 13):

$(\sqrt{2} + 1)/1 = 2 + \text{residue}$, $(a) = (\sqrt{2} - 1)$, the residue (a) equals to 0.414... and $1/(\sqrt{2} - 1) = 2 + \text{residue}$, $(a+1) = (3 - 2\sqrt{2})$, the residue $(a+1)$ equals to 0.172... and in general residue $(n) / \text{residue } (n+1) = 2 + \text{residue } (n+2) \dots$

This calculation cascade always results from the quotient 2 and the next smaller residue: the permanent resulting tiny residue makes $\sqrt{2}$ an irrational value because it never reaches 0.

This irrational property of $\sqrt{2}$ in octagon geometry can also be verified very precisely with rational approximations like the dimensions 49.0 pr and 20.3 pr after reduction by 7, i.e. with $7 \times 7.0 \text{ pr} / 7 \times 2.9 \text{ pr}$, as with 70 / 29 tenths pr:

$70 : 29 = 2 \text{ and residue } 12$

$29 : 12 = 2 \text{ and residue } 5$

$12 : 5 = 2 \text{ and residue } 2$

$5 : 2 = 2 \text{ and residue } 1$,

and thus the obvious end of this calculation cascade for the rational value 70 : 29.

The result for the arch opening is $(70 - 29) : 2 = 41 : 2 = 20.5$ and therefore seven times: 143.5 tenths pr, i.e. 14.35 pr This leaves the pier with 2.975 pr in the corners, as already described above (29.48 cm for the pr and 14.445 meters for the average octagon diameter).

The only early historical sources, we know about 70/29 (99/70) is Heron of Alexandria [Svenshon 2008; Svenshon 2010]. He gave in antiquity the following instruction for the calculation of $\sqrt{2}$,

$(7 + 1/14) : 5 = (99/14) : (70/14)$,

i.e. $\sqrt{2} = 99 : 70 (= 1.414)$, [instead of inaccurately $\sqrt{2} = 7 : 5$, i.e. $1.400 < \sqrt{2} = 1.414 \dots$].

From this value we can directly derive $(\sqrt{2} - 1) / 1 = (99 - 70) / 70 = 29 : 70$ and thus the measure sequences of 70 : 29 in the octagon [Pieper, Schindler 2017, pp. 206-211].

14/ Lo schema delle misure intorno alla struttura (elaborazione di Bruno Schindler).

The measurement diagram around the building structure (by Bruno Schindler).

15/ Il pattern geometrico e le dimensioni verticali dell'ottagono (elaborazione di Bruno Schindler).

The geometric pattern and the vertical dimensions of the octagon (by Bruno Schindler).

The problem of securing the precise building dimensions during the building process

As we mentioned, the geometry behind all that measures derives from the lines of force of the building suggesting a pattern that would all have been constructed from the center: the commune 20 pr side of the outer hexadecagon with 100 pr diameter doubling of the octagon with 48 pr, with

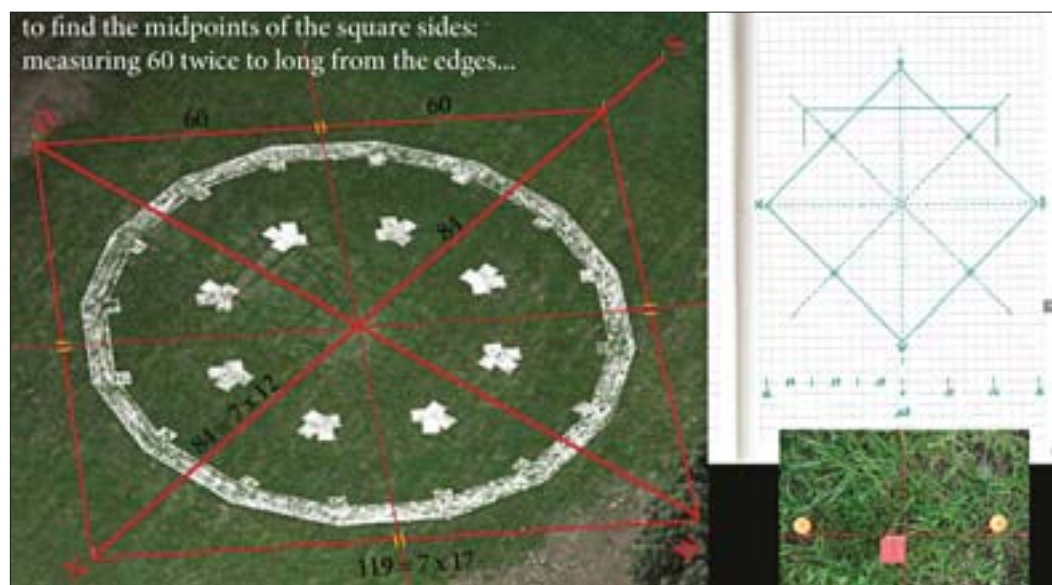
$$48 = 14 + 3 + 14 + 3 + 14,$$

i.e. with an arcade of 14 pr, as has been archaeologically documented for the engraved arch alignments on the foundation crown (fig. 12). This proves that the doubling of the polygon in whole feet was considered purely geometrical for the executed 100 pr dimension of the hexadecagon [Pieper, Schindler 2017, pp. 135-142]. Thus, there was a first premeditation for the pillars and arches of the central octagon. However, the dimensions of the octagon were increased from 48 pr to 49 pr and thus the octagon side from 20 pr to 20.3 pr, as well as the arch opening from 14 pr to 14.35 pr, with the known measure sequence related to $\sqrt{2}$,

$$49 = 14.35 + 2.975 + 14.35 + 2.975 + 14.35.$$

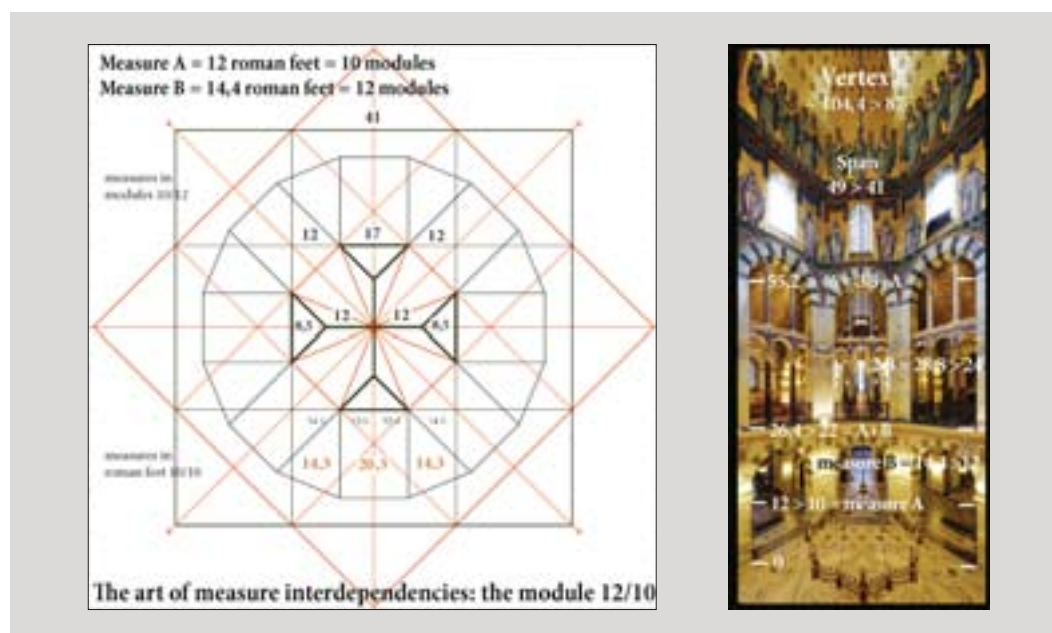
This additional operation enabled the master builders to slightly detach the inner subdivision of the octagon from the outer hexadecagon in order to achieve a better adjustment to the proportions of $\sqrt{2}$ and to execute this extremely sensitively with a 1/20 pr (1.5 cm) accuracy. [Pieper, Schindler 2017, p. 143].

In the middle of the construction work in the center of the church building, where either excavation work was being carried out or heavy stone material was being transported for the completion of the foundations, it was almost impossible to protect such precise markings of the measurements there. Reference points were therefore better set outside the actual construction process so that the necessary measurement data could be retrieved at any time from the coordinates marked on the outside with pegs using occasionally tensioned ropes in the middle of the construction site. This suggests the otherwise arbitrary distribution of precisely repeated measurements in the structure, in particular the diameter of the octagon of 49 pr.



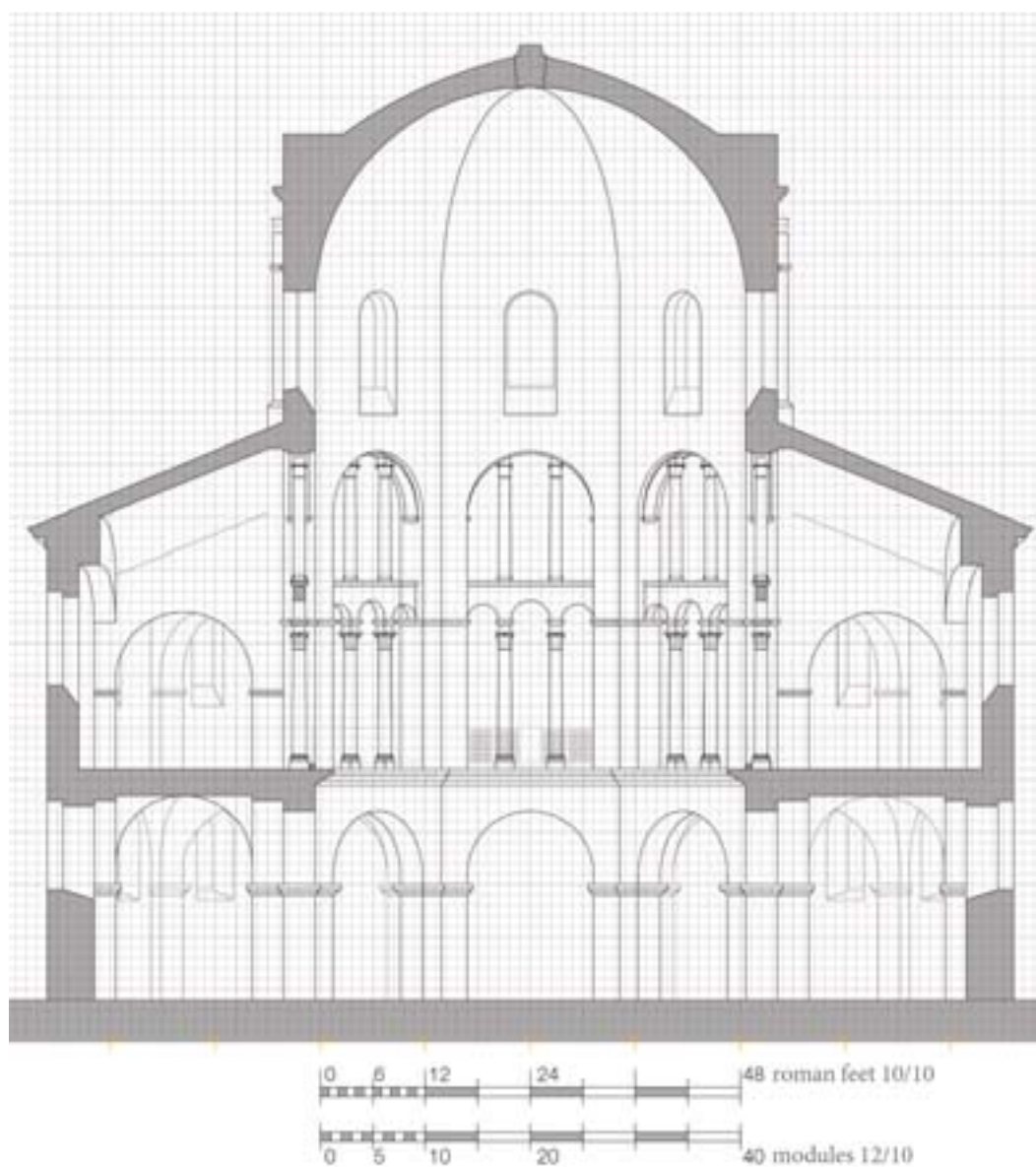
guiti tutti sulle linee laterali dei due quadrati, sempre partendo dai punti medi dei lati. Perfino la misura del diametro della circonferenza inscritta nell'esadecagono pari a 100 pr e l'aggiunta di 5 pr per la sezione trasversale del muro esterno, arrivando a una valore totale di 110 pr per l'intero edificio centrale con 22 pr per ciascuno dei sedici lati esterni. È interessante notare che la tolleranza è sempre dell'ordine di 1,5 cm (1/20 pr). La sezione

trasversale inferiore del muro dell'ottagono misura esattamente 3,5 pr (1,03 m), il che si adatta al modulo generale dello schema di misurazione che adotta multipli di 7 pr. Ciò significa che il diametro del nucleo ottagonale della Cappella Palatina di Aachen misura esattamente 56 pr (16,51 m) alla base, per effetto della riduzione della sezione del muro e 55 pr (16,21 m) alla sommità. In alto troviamo un ottagono centrale di 55 pr visibile dall'esterno,



16/ Interno dell'ottagono in pes agrimensorum
(elaborazione di Bruno Schindler).

*Interior view of the octagon in pes agrimensorum
(by Bruno Schindler).*



che emerge dall'esadecagono di 110 pr (32,43 m), misura che è due volte l'ampiezza dell'ottagono: quello che si ottiene è uno schema di continue operazioni di bisezione nella struttura volumetrica della chiesa!

L'elevazione nello spazio centrale ottagonale
Focalizzando l'attenzione sull'architettura², l'ottagono centrale mostra solo un numero esiguo di elementi strutturali. Pochi riferimenti formali forniscono informazioni sull'ordine dimensionale, che tuttavia è

stato specificato con grande precisione dai dati del rilievo del 2002 tradotti nel sistema decimale del *pes* romano (fig. 15). C'è una successione verticale quasi ininterrotta lungo gli otto spigoli verticali che insistono sui vertici dell'ottagono, dal piano terra fino alla sommità. Una pesante cornice in travertino interrompe questa verticalità e chiude le arcate inferiori a 26,35 pr sopra il livello del piano inferiore, utilizzato esclusivamente dai sacerdoti per la celebrazione delle messe presso diversi altari all'epoca

Reconstruction of the measurement on the historic construction site and the measurement diagram

The measurement diagram matching the building dimensions¹ can be reconstructed using two large squares with pegs precisely measured on either square side (fig. 14) [Hyginus 800]. In our measurement experiment in 2017, we were testing successfully this diagram and the associated measurement method for its practicability with a measuring bar or canna of 12 pr (according to Isidore of Seville; Isidorus 1911). In addition, we marked the result of the measurements with white sand to visualize the floor plan resulting from the measurement method (figs. 2, 3); the result was a plausible image with identical dimensions of the original building.

Starting from the center of the building, both main axes were aligned exactly to the four cardinal points. The first square to measure was the twisted one. The half-diagonals of 84 pr were measured from the center to the corners, i.e. 7 pr x 12 pr of the measuring bar. The sides of the square measure approximately 7 pr x 17 pr = 119 pr. Their centers were then measured from the 4 corners, marking each with 5 pr x 12 pr = 60 pr always slightly beyond the very center in order to determine the exact middle between the two measured values. It was sufficient to join these interpolated centers to obtain the other two axes of the octagon and to determine the second large square in the same way. The intersection of both squares now results in an octagon with sides of exactly 49.2 pr (fig. 14)! On the square sides, however, only 24.5 pr, i.e. exactly 49 pr, are measured starting from the center of the square sides. If the cross-sections of the surveying pegs were exactly 0.2 pr = 2/10 pr, then with the 8 pegs at the corners of the diagram's octagon, it was precisely possible to fit perfectly the rope alignments of the building's octagon with those pegs! In particular, this is one exact result of the evaluation of the scan of Sapienza University of Rome.

The further measuring steps could then all be carried out on the side lines of the two squares, always from the centers of the square sides. Even the dimension of the hexadecagon of 100 pr and additionally 5 pr each for the cross-section of the outer wall, i.e. 110 pr for

17/ Anonimo, disegno del trono di Carlo Magno nella sua forma originaria (British Museum, Depot of Manuscripts, Add. 6735, fol. 6. Schindler, Pieper 2017, p. 82 fig. 114; pubblicato prima in Keussens 1898, p. 284 e in seguito in Apphun 1962, fig. 4).

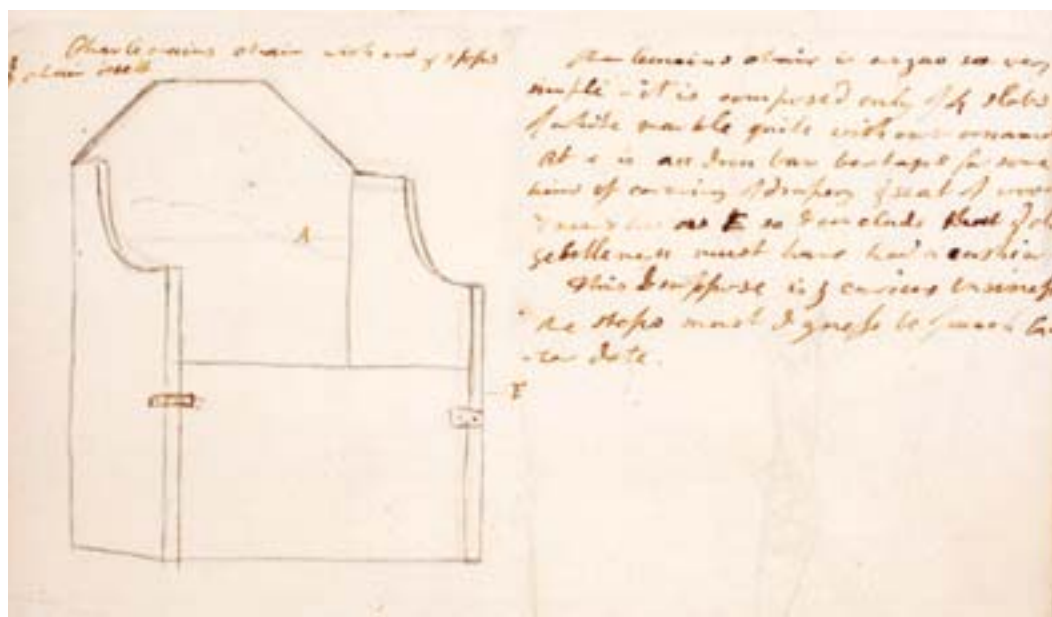
Anonymous, drawing of the Charlemagne throne with its original octagonal shape, 18th century (British Museum, Depot of Manuscripts, Add. 6735, fol. 6. Schindler, Pieper 2017, p. 82 fig. 114; first published by Keussens 1898 p. 284 and later by Apphun 1962 fig. 4).

18/ Il cosiddetto Karlsthron nella Cappella Palatina (foto di Bruno Schindler).
The so-called Karlsthron inside the Palatine Chapel (photo by Bruno Schindler).

the entire diameter of the central building with 22 pr for the sixteen outer sides. It is noteworthy that the tolerances are always in the range of 1.5 centimeters (1/20 pr). The lower wall cross-section of the octagon measures exactly 3.5 pr (1.03 m), which fits the general modularity of the measurement diagram of multiples of 7 pr. This means that the octagonal core of the Aachen Palatine Chapel has a diameter of exactly 56 pr (16.51 m) at the bottom and 55 pr (16.21 m) at the top after the reduction of the wall section. At the top there is a central octagon of 55 pr visible from outside, which rises out of the hexadecagon of 110 pr (32.43 m), which is twice as wide as the octagon: a scheme of continuous bisections was achieved in the volumetric structure of the church!

The elevation in the octagonal central space

In terms of architectural detail, the central octagon shows only a minimum of structural elements.² Only few formal references provide any information about a dimensional order, which was, however, specified with great precision from the data of the 2002 survey translated in the decimal system of the Roman pes (fig. 15). There is an almost uninterrupted vertical course of the eight edges in the corners of the octagon, from the ground floor to the apex of the eight-sided vault. There is a heavy travertine cornice interrupting this verticality and closing the lower arcades at 26.35 pr above the lower floor level, which was used entirely by the priests for the celebration of masses at various altars in Charlemagne's time. Only the western parts were used as entrance. On the floor above, the corner pillars continue to rise and merge directly into the semi-circular arches of the above gallery without any chapter cornice. The transition of those pillars to the arches and to the octagonal tambour above thus remained architecturally undefined but was the place where white travertine stone merged with the final ceiling mosaic at 28.8 pr above the cornice of the ground floor. The vault ceiling reaches its upper apex at 104.4 pr. These are the only confirmed building dimensions that have not been lost because of the 1902 alterations. The lower arcade rests on the capital cornices of the lower octagon corner pillars, which were renewed in the 17th or 18th century but they

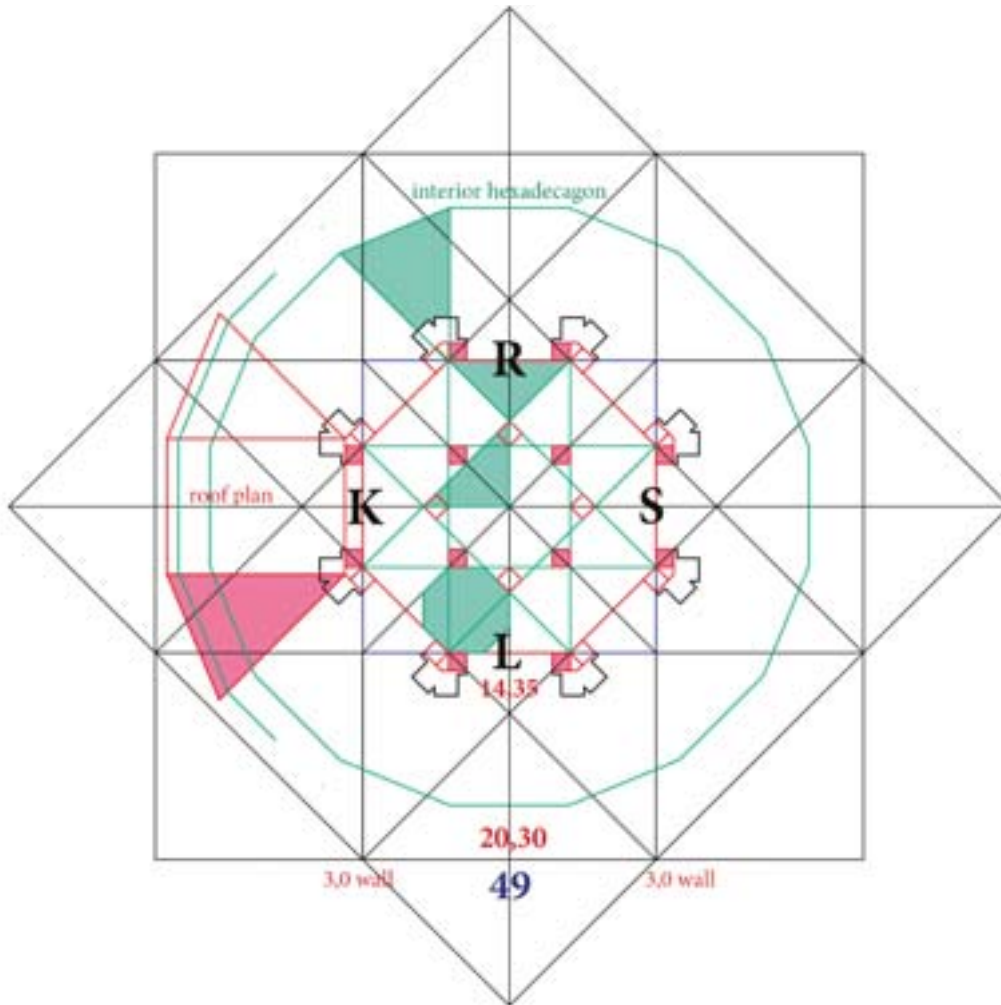


di Carlo Magno e solo la parte occidentale veniva utilizzata come ingresso. Al piano superiore, i pilastri d'angolo continuano a salire e si fondono direttamente con gli archi della galleria superiore senza alcun elemento di separazione. Il passaggio di questi pilastri agli archi e al tamburo ottagonale che si trova al di sopra è rimasto architettonicamen-

te indefinito, ma doveva trovarsi nel punto in cui il bianco travertino si fondeva con il mosaico del soffitto a una quota di 28,8 pr sopra della cornice del piano terra. La chiave della volta è a quota 104,4 pr. Queste sono le uniche dimensioni confermate dell'edificio che non sono andate perdute a causa delle modifiche apportate nel 1902.



19/ Geometria dell'ottagono utilizzata nella Cappella Palatina: ottagono interno ed esterno, esadecagono e copertura (elaborazione di Bruno Schindler).
Geometry of the octagon used for all parts of the Palatine Chapel: interior and exterior octagon and hexadecagon and roof plan (by Bruno Schindler).



Measurement diagram with two squares, diagonals of 168 p.R.
 general geometry of the central octagon architecture
 and Monogramm of Charlemagne

Gli archi del livello inferiore poggiano sulle cornici dei capitelli dei pilastri d'angolo dell'ottagono, che furono rifatte nel XVII o XVIII secolo ma che furono comunque posizionate allo stesso livello dei blocchi di pietra medievali all'altezza originaria di 12 pr. Se osserviamo l'arcata a est che ha una campata di 14,35 pr, possiamo notare che l'altezza del piano inferiore di 26,35 pr è esattamente la somma di 12 pr + 14,35 pr = 26,35 pr. I pilastri del piano superiore sono alti 14,4 pr + 14,4 pr = 28,8 pr, cosicché in quel punto viene raggiunto un livello di 55,15 pr (=

diametro dell'ottagono nella parte superiore, inclusa la sezione del muro). Rimangono esattamente 49,25 pr fino alla chiave, posta a 104,4 pr, equivalente alla campata leggermente ampliata della volta superiore di 14,52 metri. Consideriamo le due dimensioni parziali $A = 12$ pr e $B = 14,4$ pr (o anche 14,35 pr), che in una ingegnosa ripetizione piano inferiore + galleria + diametro dell'ottagono troviamo l'altezza totale interna, ovvero: $(A + B) + (B + B) + (3 \times B + 2 \times A/4) = 104,4$ pr $(12 + 14,4) + (14,4 + 14,4) + (14,4 + 3 + 14,4 + 3 + 14,4) = 104,4$ pr.

were nevertheless set into the same original stone block layer at the original height of 12 pr. If we look at the eastern arched arcade with a span of 14.35 pr, we can see that the lower storey height of 26.35 pr is exactly the sum of 12 pr + 14.35 pr = 26.35 pr. The pillars on the upper floor above look high at 14.4 pr + 14.4 pr = 28.8 pr, so that the level of 55.15 pr is achieved there (= diameter of the octagon at the top, including wall cross-section). Exactly 49.25 pr remain up to the apex at 104.4 pr, i.e. the slightly widened vault span of 14.52 meters at the top.

Let us consider the two partial dimensions $A = 12$ pr and $B = 14.4$ pr (also 14.35 pr), which in a clever repetition first floor + gallery floor + octagon's diameter result in the total height of the interior, i.e. $(A + B) + (B + B) + (3 \times B + 2 \times A/4) = 104.4$ pr $(12 + 14.4) + (14.4 + 14.4) + (14.4 + 3 + 14.4 + 3 + 14.4) = 104.4$ pr. Thus, after comparing both measures A and B using Euclid's algorithm, their greatest common divisor is 2.4 pr is found! This is the common module of all measures of the building, which is also to be defined as 1.2 pr with 12/10 pr in the foot measurement: this module is the pes agrimensorum [Isidorus 1848; Isidorus 1911; Wintermantel 2018], which was largely in use, particular in Ravenna and the Lombard provinces of northern Italy at the time of Charlemagne ([Pieper, Schindler 2017, pp. 212-217].

The pes agrimensorum resulted in a module $M = 12/10$ pr with the following whole module dimensions for the elevation in the octagon (fig. 16):

- Octagon = 41 M (= 49.2 pr in the upper area)
- Polygon side = 17 M
- Corner pillar approximate = 2.5 M
- Corner pillar height = 10 M
- Arc span = 12 M
- Lower arcade height = 18 M
- Lower storey = 22 M
- Gallery pillar height = 24 M
- Upper arcade height = 30 M
- Tambour and vault = 41 M.

Conclusion

Both units of measurement, the Roman pes capitulinus and the northern Italian pes agrimensorum, have a common division of 1/10

pes capitolinus, the Roman foot with decimal division. Charlemagne used the roman foot and the measure practice of Theodoric's reign of northern Italy for his own church building in Aquisgranum (Aachen), the place where the later rulers were to be crowned in his memory. The dimensions of the sixteen-sided ambulatory and the lower wall sections of the octagon record that the building was initially dimensioned with a decimal roman pes capitolinus of 29.48 cm: a wall section of 3.5 pr in the lower octagon of 49 pr diameter and a hexadecagon of 100 pr with a wall section of 5 pr. The measures of the inside elevation shows the proportional perfection of the Lombard building tradition in northern Italy related to the pes agrimensorum of 35.37 cm. The architecture of the Aachen Palatine Chapel was only one part of the renewed ancient Roman imperial authority that was enforced, both institutionally and formally in the Carolingian Empire. In the residence of Aquisgranum, which was permanent for several years at the time, this form of rule was condensed in the design of the Palatinum, in which the square and octagon mutated into a symbol of Charlemagne's rule in his throne, in his basilica and even in his signature (figs. 17, 18, 19).

English text by the author

1. For further details: Pieper, Schindler 2017, pp. 155-164.

2. For further details: Pieper, Schindler 2017, pp. 147-154, p. 164.

Così, confrontando entrambe le misure *A* e *B* usando l'algoritmo di Euclide del quale si è già parlato, si trova il loro massimo comun divisore $MCD = 2,4$ pr! Questo è il modulo comune a tutte le misure dell'edificio, definito anche come 1,2 pr con un rapporto 12/10 pr nella misura del piede: ma questo modulo coincide con il *pes agrimensorum* [Isidorus 1848; Isidoro 1911; Wintermantel 2018], ampiamente utilizzato in particolare a Ravenna e nelle province longobarde del Nord Italia all'epoca di Carlo Magno [Pieper, Schindler 2017, pp. 212-217]. Il *pes agrimensorum* introduce dunque nell'ottagono un modulo $M = 12/10$ pr con le seguenti dimensioni modulari intere per il suo alzatao (fig. 16):

- ottagonato = 41 *M* (= 49,2 pr nella parte superiore)
- lato del poligono = 17 *M*
- pilastro d'angolo approssimativo = 2,5 *M*
- altezza del pilastro d'angolo = 10 *M*
- campata dell'arco = 12 *M*
- altezza dell'arcata inferiore = 18 *M*
- livello inferiore = 22 *M*
- altezza del pilastro della galleria = 24 *M*
- altezza dell'arcata superiore = 30 *M*
- tamburo e volta = 41 *M*.

Conclusioni

Entrambe le unità di misura, il *pes romanus capitolinus* e il *pes agrimensorum* dell'Italia settentrionale, hanno un multiplo comune pari a 1/10 di *pes romanus capitolinus*, ovvero il piede romano con divisione su base 10. Carlo Magno ricorse al piede romano e al sistema di misurazione in uso nel regno di

Teodorico nel Nord Italia per la costruzione della sua chiesa ad *Aquisgranum* (Aachen), il luogo in cui i futuri sovrani sarebbero stati incoronati in sua memoria.

Le dimensioni del deambulatorio a sedici lati e delle sezioni del muro inferiore dell'ottagono indicano che l'edificio fu inizialmente dimensionato con un *pes romanus capitolinus* di 29,48 cm, basato su una suddivisione decimale: una sezione di muro di 3,5 pr nell'ottagono inferiore pari a 49 pr e un esadecagono di 100 pr con una sezione del muro di 5 pr. Le misure dell'alzatao interno mostrano la perfezione proporzionale della tradizione edilizia longobarda dell'Italia settentrionale in relazione al *pes agrimensorum* di 35,37 cm. L'architettura della Cappella Palatina di Aachen rappresentava parte della rinnovata autorità imperiale romana, che fu in seguito attuata sia istituzionalmente che formalmente nell'Impero Carolingio. Nella residenza di *Aquisgranum*, che per diversi anni fu sede permanente della corte imperiale, questa forma di governo prese forma nel disegno del *Palatinum*, nel quale il quadrato e l'ottagono si trasformarono in un simbolo del potere di Carlo Magno, e ciò si riscontra nel suo trono, nella sua basilica e persino nella sua firma (figg. 17, 18, 19).

Traduzione dall'inglese della Redazione

1. Per approfondimenti: Pieper, Schindler 2017, pp. 155-164.

2. Per approfondimenti: Pieper, Schindler 2017, pp. 147-154, p. 164]

References

La ricerca è stata pubblicata in Pieper, Schindler 2017: tutta la letteratura e i documenti sono reperibili alle pp. 227-238. Tuttavia le più importanti pubblicazioni scientifiche che giustificano o completano la nostra indagine, che altrimenti utilizza l'edificio stesso come la fonte più importante di conoscenza, sono di seguito elencate. / *The research was published in Pieper, Schindler 2017: all literature and documents are found at pp. 227-238. Nevertheless, the most important scientific publications that substantiate or complete our investigation, which otherwise uses the building itself as the most important source of knowledge, are collected there.*

- Alcuinus, Epistulae 1777 = Alkuin, Albinus Flaccus sive Alcuinus. *Epistulae*. In *Editio Frobenius, Opera Alcuini Abatis, Carolimagni Regis ac Imperatoris Magistri Opera*. Münchener Staatsbibliothek, Ratisbonae 1777. Epistula 84. <https://books.google.de/books?id=xkWSyeZNN8UC&pg=PA49&lpg=PA49&dq=Alkuin+%22epistola+49%22&source=bl&ots=mOV6eC4jDB&sig=5cmvQur58zHLJzqRq0kKiA4a69w&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwiyOYL5n_PUAhWLXBQKHVmcDqgQ6AEIPzAD#v=onepage&q=Alkuin%20%22epistola%2049%22&f=false>.
- Braunfels 1965 = Wolfgang Braunfels. *Karl der Große*. Lebenswerk und Nachleben. Volume 1-4, Düsseldorf 1965-1967.
- Braunfels 1968 = Wolfgang Braunfels. *Die Welt der Karolinger und ihre Kunst*. München 1968.
- Buchkremer 1955 = Joseph Buchkremer. Der Dom zu Aachen. Beiträge zur Baugeschichte. In *Hundert Jahre Denkmalpflege am Aachener Dom*. Band III. Aachen 1955.
- Chouquer, Favory 2001 = Gérard Chouquer, François Favory. *L'arpentage Romain*. Paris 2001, pp. 268-271. ISBN: 2877722163.
- Euclide VII - 2 = Vincenzo Flauti. *Gli Elementi di geometria di Euclide, emendati in que' luoghi, in cui una volta furono viziati da Teone, o da altri; e ne' quali sono restituite alcune definizioni, e dimostrazioni dello stesso Euclide*. Napoli, nella stamperia per le opere del prof. Flauti 1834. Libro VII, Prop. 2.
- Gerhardt, Kurrer, Pichler 2003 = Rolf Gerhardt, Karl-Eugen Kurrer, Gerhard Pichler. The methods of graphical statics and their relation to the structural form. In *Proceedings of the First International Congress on Construction History*. Madrid, 20th - 24th January 2003. Ed. by Santiago Huerta. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura Madrid. Vol. 2, 2003, pp. 997-1006.
- Heckner, Beckmann 2012 = Ulrike Heckner, Eva-Maria Beckmann (eds.). *Die karolingische Pfalzkapelle in Aachen. Material - Bautechnik - Restaurierung*. Arbeitsheft der rheinischen Denkmalpflege 78, Worms, Wernersche Verlagsgesellschaft 2012. ISBN: 9783884623251.
- Hyginus 800 = Hyginus gromaticus. *De Limitibus Constituendis*. Codex Vaticanus, Biblioteca Apostolica Vaticana, Pal. Lat. 1564, Foll. 82v - 108v (149v), 800 (?). In *Hyginus - Das Feldmesserbuch*. Edition Jens - Olaf Lindermann, Eberhard Knobloch und Cosima Möller. WBG Darmstadt 2018, pp. 111-211, in part. fig. 18 (Pal. 86r), 29 (Pal. 89v), 54 (Pal. 98r), 79 (Pal. 108r). ISBN: 9783534269907.
- Isidorus 1848 = Isidorus Hispalensis. *Etymologiae, Libri XX (Excerpta) - Liber XV - De mensuris agrorum*. Edition Lachmann / Blume / Rudorff, 1848/52.
- Isidorus 1911 = Isidori Hispalensis Episcopi. *Etymologiarum, sive Originum libri XX*. Editio W. M. Lindsay, Oxford 1911.
- Konneggen 2011 = Lydia Konneggen. Opere mirabili constructa. Ein kurzer bauhistorischer Abriss zum Aachener Dom. In *Dombaumeistertagung in Aachen 2009: Vorträge zum Aachener Dom*. Aachen 2011, pp. 29-40.
- Krücken 2016 = Monika Krücken (ed.). *Offensichtlich Verborgten. Die Aachener Pfalz im Fokus der Forschung*. Geymüller, Aachen 2016. ISBN: 9783943164169.
- Ley 2014 = Judith Ley. Warum ist die Aachener Pfalzkirche ein Zentralbau? Der neue Salomonische Tempel als Vorbild herrschaftlicher Kirchenstiftung. In Clemens Bayer, Max Kerner, Harald Müller. *Der Aachener Dom in seiner Geschichte*. Quellen und Forschungen, Vol. I, 2014, pp. 95-112. ISBN: 9783795428013.
- Maintz 2012 = Helmut Maintz. *Sanierung der Mosaiken, Marmorverkleidung und Fußböden im Zentralbau des Aachener Doms*. Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauverein, Band 14 - 2012. Thouet, Aachen 2012.
- Pieper, Schindler 2017 = Jan Pieper, Bruno Schindler. *Thron und Altar, Oktogon und Sechzehneck. Die Herrschaftsikonographie der karolingischen Pfalzkapelle zu Aachen*. Berlin: Geymüller Verlag für Architektur, 2017. ISBN: 9783943164381.
- Pritchard 2023 = Douglas Pritchard. The intersection of technology, graphic communication and cultural heritage representation. *Disegnare. Idee Immagini*, 66, 2023, pp. 48-63. ISSN: 1123-9247. <https://dsdra.web.uniroma1.it/sites/default/files/allegati/Disegnare%2066_2023_0.pdf>.
- Pritchard et al. 2023 = Douglas Pritchard, Marika Griffio, Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Yannick Ley. Evolution of recording methods: the Aachen Cathedral World Heritage Site documentation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1241-1249. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1241-2023, 2023>>.
- Schaub 2011 = Andreas Schaub. Neue archäologische Untersuchungen im Aachener Dom. In *Dombaumeistertagung in Aachen 2009: Vorträge zum Aachener Dom*. Aachen 2011, pp. 101-108.
- Schindler et al. 2005 = Bruno Schindler, Wilfried Führer, Rolf Gerhardt, Jan Pieper. Rekonstruktion historischer Bautechniken: Skalierung der Bausubstanz am Beispiel der Aachener Pfalzkapelle. In RWTH-Themen: Berichte aus der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1/2005, herausgegeben im Auftrag des Rektors der RWTH-Aachen, 2005, pp. 56-57.
- Strzygowski 1904 = Joseph Strzygowski. *Der Dom zu Aachen und seine Entstellung. Ein kunstwissenschaftlicher Protest*. Leipzig 1904.
- Svenshon 2008 = Helge Svenshon. *Einblicke in den virtuellen Himmel: Neue und alte Bilder vom Inneren der Hagia Sophia in Istanbul*. Tübingen/Berlin 2008. ISBN: 9783803006912.
- Svenshon 2010 = Helge Svenshon. Das Bauwerk als aestheton soma. Die Hagia Sophia im Spiegel antiker Vermessungslehre und angewandter Mathematik. In Falko Daim, Jörg Drauschke. *Byzanz - Das Römerreich im Mittelalter*. Monographien des RGZM, 84, Verlag des Römisch-Germanischen Zentralmuseums, Mainz 2010, pp. 59-95.
- Thomassin 1802 = Louis François Thomassin. *Instruction sur les nouvelles mesures, publiée par ordre du Ministre de l'Intérieur [...] avec les Tables de comparaison entre les Mesures anciennes du pays de Liège, et celles qui les remplacent dans le nouveau système métrique [...]*. Latour, Liège, an X, 1802.
- Wehling 1995 = Ulrike Wehling. *Die Mosaiken im Aachener Münster und ihre Vorstufen*. Arbeitsheft der rheinischen Denkmalpflege 46, Rheinlandverlag Köln 1995. ISBN: 379214914.
- Wintermantel 2018 = Stefan Wintermantel. *Geometrie, Maß und Zahl an der Aachener Marienkirche Karls des Großen, an der karolingischen Abteikirche in Kornelimünster und an der Einhardsbasilika in Michelstadt-Steinbach*. Zeitschrift des Aachener Geschichtsvereins, 119/120, 2018, pp. 51-194.



Carlo Bianchini

Sulle unghie coniche della Cappella Palatina di Aachen *The conical vaults in the Palatine Chapel in Aachen*

<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-06.pdf>

Towards the end of the 8th century, Charlemagne established the capital of the Holy Roman Empire in *Aquae Granni*; this event led to the construction of a new palatine complex destined to embody the cultural and political *renovatio* initiated by the emperor. The Palatine Chapel is the hub of this ensemble, a building that merges Roman and Byzantine traditions, but also displays several intriguing anomalies revealed by an analysis of the data collected during two systematic surveying campaigns. The hypothesis presented in this contribution suggests that the design of the Palatine Chapel was unitary and holographic, supervised by Odo of Metz who, on the one hand, seamlessly carried on from the past, but on the other introduced original elements by redesigning certain stylistic features belonging to his native Armenian culture. This theory is based above all on the study of the conical panels of the upper ambulatory – a one-of-a-kind structure in late ancient and early medieval western architecture, but found in some 7th-century churches in Armenia. Apart from the purely architectural implications, this hypothesis strongly influences the history of geometric thinking. In fact, if the knowledge available when Odo was alive was the knowledge handed down only by written sources, the conical vaults in the Palatine Chapel would be inexplicable, given their complexity. This suggests that medieval geometry was more advanced compared to what traditional historiography reports, involving oral teachings and practices not written on parchment, but on stone.

Keywords: conical vaults, squinches vaults, early-medieval stereotomy, Palatine Chapel in Aachen, medieval practical geometry.

In the late 8th century Charlemagne decided to break with the Germanic tradition of an itinerant court and instead establish the sedes regia of his newly-formed Holy Roman Empire in the old city of Aquae Granni. This required the construction of a new palatine complex that could not only host the functions associated with government, but also reflect the scope of the political, religious and cultural renovatio launched by the Emperor [Falkenstein 1991; Polanichka 2009]. The Palatine Chapel is currently part of the Cathedral in Aachen [Buchkremer 1955]; it is not only a silent witness testifying to this crucial turning point in the history of Western Europe, but also the manifesto of a new architectural language capable of merging Roman and Byzantine traditions, without,

Sul finire dell'VIII secolo, Carlo Magno stabilisce la capitale del Sacro Romano Impero ad Aquae Granni, evento che dà il via alla costruzione di un nuovo complesso palatino destinato a incarnare la renovatio culturale e politica avviata dall'imperatore. Perno di questo insieme è la Cappella Palatina, un edificio che combina tradizioni romane e bizantine ma che mostra anche alcune intriganti anomalie messe in luce dall'analisi dei dati derivanti da due sistematiche campagne di rilevamento. L'ipotesi presentata in questo contributo suggerisce che la Cappella Palatina sia frutto di un progetto unitario, olografo e sotto il controllo di Odone da Metz che se da un lato si pone in continuità con il passato, dall'altro introduce elementi originali rielaborando alcuni stilemi della sua cultura armena di provenienza. Questa teoria si fonda soprattutto sullo studio delle unghie coniche dell'ambulacro superiore, struttura unica nel suo genere nel panorama dell'architettura occidentale tardoantica e alto-medievale e invece rintracciata in alcune chiese armene del VII secolo. Oltre alle implicazioni di carattere puramente architettonico, quest'ipotesi influenza fortemente anche la storia del pensiero geometrico. Infatti se le conoscenze dell'epoca di Odone fossero quelle tramandate dalle sole fonti scritte, le volte coniche della Cappella Palatina sarebbero inspiegabili data la loro complessità. Ciò suggerisce che la geometria medievale fosse più avanzata di quanto la storiografia tradizionale ammette, con insegnamenti orali e pratiche fissati non su pergamena, ma sulla pietra stessa.

Parole chiave: volte coniche, volte a tromba, stereotomia alto-medievale, Cappella Palatina di Aachen, geometria pratica medievale.

Quando sul finire dell'VIII secolo, rompendo con la tradizione germanica che voleva la corte itinerante, Carlo Magno decide di stabilire la

sedes regia del neonato Sacro Romano Impero presso l'antica *Aquae Granni*, si manifesta l'esigenza di realizzare un nuovo complesso



1/ *Pagina precedente*. Cattedrale di Aachen. La nuvola di punti complessiva (elaborazione di Carlo Bianchini). Previous page. *Aachen Cathedral. The overall points cloud* (by Carlo Bianchini).

2/ Cattedrale di Aachen. Sezione orizzontale della nuvola di punti complessiva (elaborazione di Carlo Bianchini). *Aachen Cathedral. Horizontal section of the overall points cloud* (by Carlo Bianchini).



palatino in grado non solo di ospitare le varie funzioni connesse con le attività di governo ma anche di esplicitare la portata della *renovatio* politica, religiosa e culturale avviata dall'Imperatore [Falkenstein 1991; Polanichka 2009]. La Cappella Palatina attualmente incastonata nella Cattedrale di Aachen [Buchkremer 1955] è dunque non solo testimone silenzioso di questo snodo cruciale della storia dell'Europa occidentale ma anche il manifesto di un nuovo linguaggio architettonico capace di tenere assieme le tradizioni romana e bizantina senza tuttavia rinunciare a presentarsi come l'espressione originale di una nuova epoca [Kleinbauer 1965; Bosman 2012; Müller 2014].

L'incipit del progetto carolingio non può non inquadrarsi nel contesto delineato da Richard Krautheimer: «*Among the great number of edifices erected throughout the Middle Ages with the intention of imitating a highly venerated prototype, one group is particularly suitable for establishing the nature of a mediaeval copy: the imitations of the Holy Sepulchre at Jerusalem*» [Krautheimer 1942, p. 3]. È bene tuttavia chiarire che il concetto di "copia" proposto dallo storico tedesco, suggestivo e sostanzialmente condivisibile, non costituisce il centro del nostro lavoro né lo è il vasto apparato simbolico evocato dalla Cappella Palatina su cui molti studiosi si sono già con successo applicati [Kühnel 2016; Ramírez-Weaver 2017].

Il nostro interesse si concentra piuttosto sull'edificio architettonico preso in esame sia in quanto "sintesi" tra progetto e costruzione, sia in quanto "fonte documentale" nello specifico ambito della stereotomia e della geometria medievale.

In questo quadro, bisogna per prima cosa osservare che, nonostante le imponenti stratificazioni derivanti dall'aggiunta del Coro gotico [Knopp 2012] e da alcuni più modesti ampliamenti di epoca successiva [Siebig 2000], questo capolavoro dell'architettura alto-medievale è giunto fino a noi conservando quasi intatti i caratteri del suo primo nucleo carolingio rendendo così ancora possibile una lettura affidabile dei suoi singoli brani.

Lettura che, combinando il vasto apparato documentale e bibliografico sedimentato nei secoli con i nuovi dati metrici acquisiti nel corso di una sistematica campagna di rilevamento¹ [Pritchard et al. 2023] (figg. 1, 2), sta consentendo non solo di riconsiderare gli studi precedenti alla luce delle nuove acquisizioni ma soprattutto di proporre ipotesi innovative rispetto ad alcune caratteristiche della fabbrica per varie ragioni rimaste ai margini della ricerca o addirittura ignote.

Appartiene certamente a quest'ultima categoria il sistema voltato degli ambulacri che circondano lo spazio centrale a tripla altezza della Cappella Palatina carolingia. Questa cintura si articola come è noto su due livelli:

however, renouncing its role as the original expression of a new age [Kleinbauer 1965; Bosman 2012; Müller 2014].

The incipit of the Carolingian project falls within the context described by Richard Krautheimer: "Among the great number of edifices erected throughout the Middle Ages with the intention of imitating a highly venerated prototype, one group is particularly suitable for establishing the nature of a medieval copy: the imitations of the Holy Sepulchre at Jerusalem" [Krautheimer 1942, p. 3]. That said, the evocative and basically shareable concept of 'copy' proposed by the German historian is not the focus of our study, nor is the extensive symbolic design of the Palatine Chapel, successfully examined by so many scholars [Kühnel 2016; Ramírez-Weaver 2017]. Instead our interest lies in the architecture of the building in question, not only as a 'synthesis' between design and construction, but also as a 'documentary source' in the specific field of stereotomy and medieval geometry.

Having set the scene, we should point out that despite the imposing stratifications pursuant to the addition of the Gothic Choir [Knopp 2012] and several more modest enlargements in later years, this early medieval masterpiece has survived to the present day with almost all of the architectural features of its initial Carolingian nucleus, thus making it possible to reliably interpret each individual element. Said interpretation combines the extensive documentary and bibliographical material sedimented over the centuries with the new metric data acquired during a systematic survey campaign¹ [Pritchard et al. 2023] (figs. 1, 2), thus allowing us to not only reconsider previous studies on the basis of the new acquisitions, but above all propose innovative hypotheses regarding several characteristics of the building which, for various reasons, have either remained on the sidelines, or have been ignored.

The vaulted system of the ambulatory surrounding the triple-height central hall of the Carolingian Palatine Chapel undoubtedly belongs to this latter group. We all know that this encirclement spans two storeys: the first floor has a series of cross vaults resting on trapeze and triangles, instead the second has

3/ Schema delle volte degli ambulacri al piano terra (a sinistra) e al primo livello (a destra) della Cappella Palatina, con indicazione del settore analizzato (elaborazione di Carlo Bianchini).

Layout of the vaults of the ambulacra on the ground floor (left) and first floor (right) of the Palatine Chapel, indicating the analysed sector (by Carlo Bianchini).

4/ Vista della nuvola di punti del settore analizzato della Cappella Palatina con sovrapposta la superficie del cono (elaborazione di Carlo Bianchini).

The points cloud in the sector analysed in the Palatine Chapel with superimposition of the surface of the cone (by Carlo Bianchini).

rampant vaults alternatively resting on bases that are either quadrangular or triangular (fig. 3).

As demonstrated in the recent past, the triangular panels on the second floor are conical vaults radially arranged so that the axis is aligned with the centre of the octagon and the directrix rests on a vertical circular arc placed on one side of the hexadecahedron that defines the outermost perimeter of the Palatine Chapel [Attenni et al. 2023].

Since it is an early medieval building, these characteristics alone are enough to render the solution unique, not only vis-à-vis the form and composition that were adopted during that period (and other periods), but also the history of building techniques and stereotomy.

In actual fact, our findings point to a much broader scenario involving not only architecture, but the development of geometric thinking during the so-called 'dark ages'.

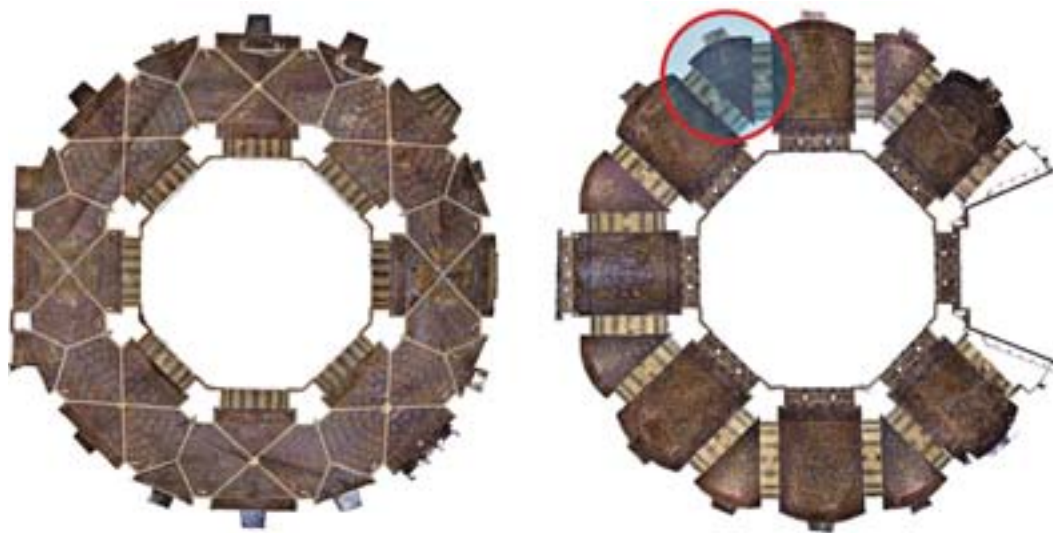
So let's start with the geometric findings resulting from the data acquired during the campaigns performed in 2022 and 2023.

First of all, we are not dealing with a 'truncated' cone (i.e., delimited by two curved sections), but rather with a 'pitch' cone, i.e., a surface delimited on one side by the directrix and on the other by the vertex.² While the former, as mentioned earlier, rests on the vertical of the side of the sixteen-sided outer polygon, the vertex rests on the edge it has in common with the vertical walls of the Palatine Chapel that delimit the triangular panel (figs. 3, 4).

So, not only is it a conical surface, but a cone whose vertex is also part of the building, acting as the final part of the panel. Furthermore, its axis is not horizontal, but inclined, since the vertex is placed further up compared to the spring line of the arch acting as a directrix. In other words, it is not a right circular cone (fig. 5).

The conical vaults of the Palatine Chapel are therefore an intriguing anomaly which, however is not mentioned in any of the albeit numerous studies that have been performed, probably due to a lack of reliable data and suitable interpretation tools.

This is why they immediately caught our attention and quickly became the focus of a systematic research aimed at discovering the



il primo caratterizzato da una successione di volte a crociera impostate su trapezi e triangoli, il secondo invece da un'alternanza di volte rampanti che si innalzano da basi ora quadrangolari ora triangolari (fig. 3).

Come è stato già dimostrato, le unghie triangolari del secondo livello si presentano come volte coniche appaie radialmente in

modo che l'asse risulti allineato con il centro dell'ottagono e la curva direttrice insista su un arco di circonferenza verticale posto in corrispondenza di un lato dell'esadecadro che definisce il perimetro più esterno della Cappella Palatina [Attenni et al. 2023].

Trattandosi di una fabbrica alto-medievale, già queste caratteristiche basterebbero a ren-



5/ La superficie conica e le sue linee principali sovrapposta alla nuvola di punti (elaborazione di Marika Griffò).
The conical surface and its main lines superimposed on the points cloud (by Marika Griffò).

dere più che singolare la soluzione adottata sia in relazione al panorama formale-compositivo del tempo (e non solo) sia nel quadro della storia delle tecniche costruttive e della stereotomia.

In realtà, le evidenze emerse da questo studio sembrano delineare uno scenario di portata assai più vasta che abbraccia non solo l'architettura ma anche lo sviluppo del pensiero geometrico nel corso dei cosiddetti "secoli bui". Partiamo allora proprio dalle evidenze geometriche che derivano dai dati acquisiti nelle campagne del 2022 e 2023.

Innanzitutto non abbiamo a che fare con un "tronco" di cono (ossia con una porzione delimitata da due sezioni curve) ma piuttosto con una "falda" di cono. In altre parole, si tratta di una superficie delimitata da un lato dalla curva direttrice e dall'altro dal vertice². Mentre la prima insiste come detto sulla verticale del lato del poligono esterno a 16 lati, il vertice giace sullo spigolo comune alle pareti verticali della Cappella Palatina che delimitano l'unghia triangolare (figg. 3, 4).

Non solo si tratta di una superficie conica, dunque, ma addirittura di un cono il cui ver-

tice fa parte della fabbrica come terminale dell'unghia. Inoltre, il suo asse non è orizzontale ma inclinato essendo il vertice posto più in alto rispetto al piano d'imposta dell'arco che funge da direttrice. In altre parole, non si tratta di un cono circolare retto (fig. 5).

Le volte coniche della Cappella Palatina rappresentano pertanto un'intrigante anomalia di cui però non si ha traccia nei pur numerosi studi precedenti, probabilmente anche per mancanza di dati affidabili e idonei strumenti di lettura.

Esse hanno per questo attratto immediatamente la nostra curiosità divenendo ben presto il centro di una sistematica attività di ricerca tesa a mettere a fuoco il significato, l'origine e le conoscenze che a quest'anomalia si accompagnano.

Queste alcune delle questioni fondamentali a cui abbiamo cercato di dare risposta:

- la soluzione architettonica che impiega volte coniche è casuale o intenzionale?
- qual è l'origine (nello spazio e nel tempo) di questa soluzione?
- quali sono le conoscenze geometriche e le nozioni tecniche che questa soluzione implica?

Un atto intenzionale?

Una possibile risposta alla prima domanda non può che venire dalla Cappella Palatina stessa attraverso una lettura "compositiva" che metta in luce le matrici che il progettista, concordemente identificato con Odone da Metz³, sembra aver utilizzato per definirne la forma, la funzione e la combinazione dei suoi spazi.

Come già ben illustrato da Bruno Schindler [Pieper, Schindler 2017], la Cappella propone un'articolazione verticale a più livelli sia per la cintura esterna degli ambulacri sia per l'ottagono centrale (figg. 6, 7). A questa segmentazione in alzato si aggiunge una sequenza tutta orizzontale che, livello per livello, distingue zone via via meno "pubbliche" dall'ingresso verso le aree riservate ai celebranti.

Secondo questo schema è pertanto possibile identificare al piano terra un ambulacro radiale composto da una successione di ambienti poligonali alti un piano (probabilmente riservati ai fedeli come in una chiesa parrocchiale; figg. 6, 7 in blu e azzurro) con-

meaning and origin of this anomaly, as well as the knowledge associated with it.

These were some of the key questions for which we tried to find answers:

- *is the use of conical vaults as an architectural solution random or intentional?*
- *what is the origin (in time and space) of this solution?*
- *what are the geometric rules and technical notions involved in this solution?*

An intentional act?

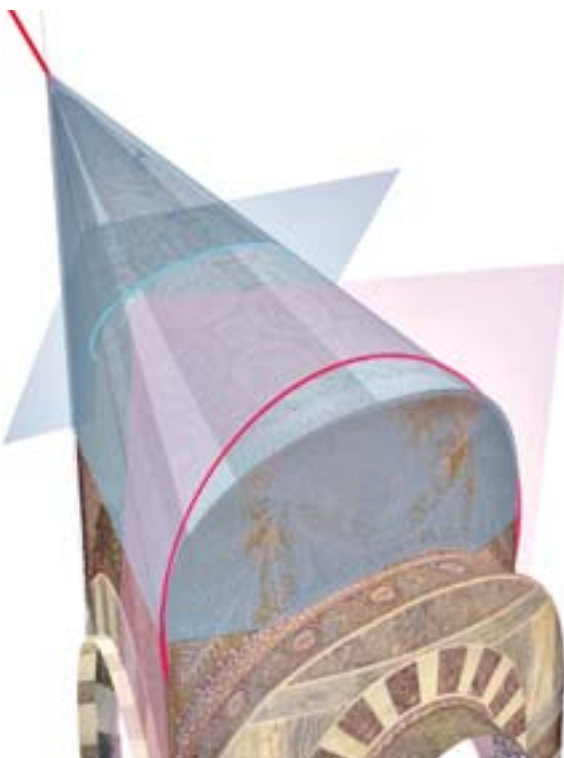
One possible answer to the first question can only come from the Palatine Chapel itself, based on a 'compositional' interpretation revealing the matrices ostensibly used by the designer (identified by common consent in Odo of Metz³) to create the form, function, and combination of its spaces.

As finely illustrated by Bruno Schindler [Pieper, Schindler 2017], the Chapel has a multi-storey vertical pattern for both the outer circle of the ambulatory and the central octagon (figs. 6, 7). A completely horizontal sequence is added to this segmented elevation; level by level, the sequence marks areas that are gradually less 'public', from the entrance to the ones reserved for the celebrants.

Using this schema we identified a radial ambulatory on the ground floor – a sequence of one-storey-high polygonal areas (probably reserved for the faithful, similar to a parish church; figs. 6, 7 in blue and light-blue) – juxtaposed against a triple-height space within the central octagon, reserved for the clerics (figs. 6, 7 in green).

Due to the central void on the upper floor, the plan involved placing the sector reserved for the emperor next to the Westwerk, while the rest of the ambulatory was probably intended for members of the court. Instead the altars on both levels (figs. 6, 7 in red) were positioned directly opposite the Westwerk and could both be seen from the imperial throne.

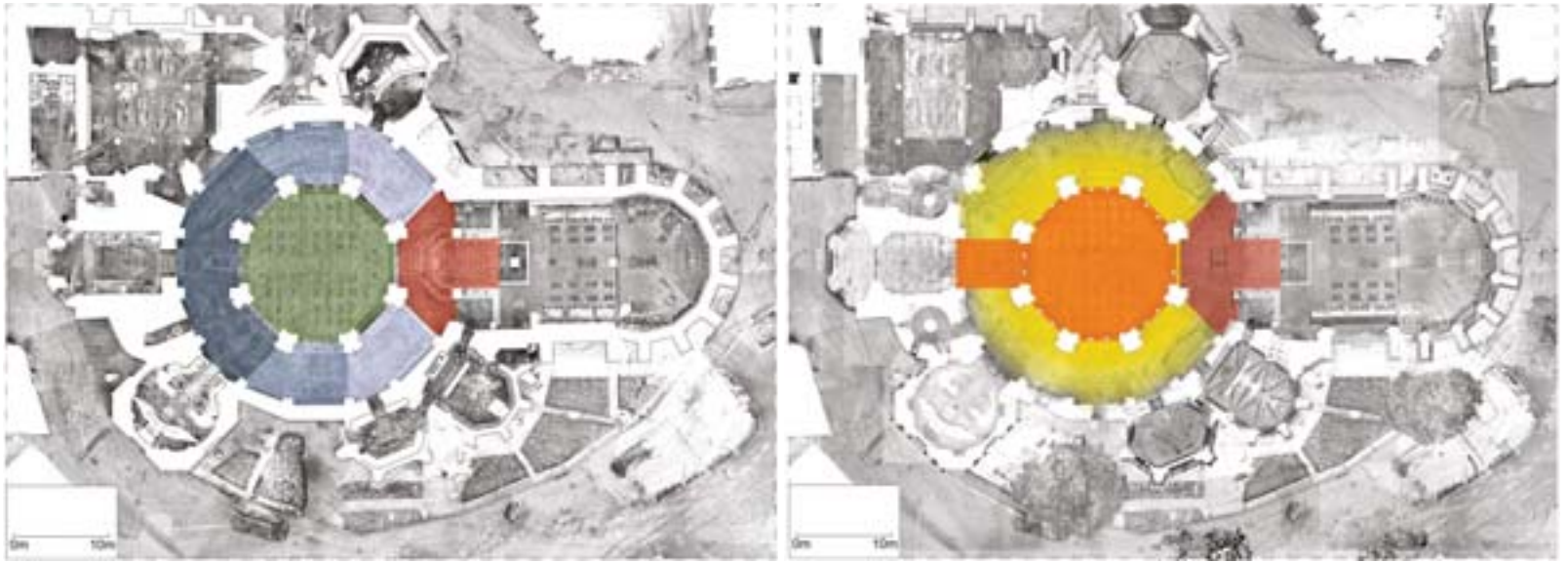
The two levels of polygonal crowns that appear to have similar characteristics are located around the triple-height octagonal space. Their properties, however, differ. In fact, the one on the ground floor presents the classical centripetal layout of a central plan building where both the walkways and the quality



61/71 In questa pagina e in quella successiva. L'organizzazione dei vari spazi della Cappella Palatina secondo Bruno Schindler: la zona riservata ai fedeli (blu e azzurro) e ai chierici (in verde) al piano terra; l'ottagono dell'oratorio imperiale (arancione); l'area al primo piano riservata alla corte (giallo); i santuari sui due livelli (in rosso) (elaborazioni di Marika Griffio).

In this page and the following. *The organisation of the spaces in the Palatine Chapel according to Bruno Schindler: the area for the faithful (blue and light blue) and the clerics (green) on*

the ground floor; the octagon of the imperial oratory (orange); the area on the first floor reserved for the court (yellow); the sanctuaries on both floors (red) (by Marika Griffio).



of the spatial components jointly encourage people's attention to shift from the outer areas towards the centre (fig. 8).

In the chapel this effect is skilfully accentuated not only by the low section of the ambulacrum in semidarkness (juxtaposed against the immense, luminous 'well' of the dome), but also by the continuity of the annular ceiling without appreciable projecting elements.

Vice versa, the space of the ambulacrum on the second floor is very discontinuous due to the massive polygonal piers of the internal crown and low arches delimiting the vaulted sectors (fig. 9). This creates a marked rhythm, both in the plan and elevation, in which rectangular areas facing the central void alternate with what are basically blind triangular segments. While the former look like a typical system of radial chapels, the latter effectively act as transition elements capable of connecting as well as compartmentalising the spaces.

Given this pattern, an observer looking out from the upper ring is immediately 'sucked' into the void of the octagon, finally succeeding in finding a foothold (only after having overstepped it) in the section at the opposite end of the ambulacrum. In this, the perceptive matrix of the first floor is decidedly centrifugal.

trapposti a uno spazio a tripla altezza interno all'ottagono centrale riservato invece ai chierici (figg. 6, 7 in verde).

Al piano superiore, dato il vuoto centrale, lo schema distributivo prevedeva il settore addossato al Westwerk riservato all'imperatore mentre il resto dell'ambulacro era probabilmente destinato a ospitare i componenti della corte. Diametralmente opposti al Westwerk, su entrambi i livelli erano invece collocati gli altari (figg. 6, 7 in rosso) che risultavano entrambi visibili dal trono imperiale.

Attorno allo spazio ottagonale a tripla altezza, pertanto, si articolano due livelli di corone poligonali che sembrano avere caratteristiche simili.

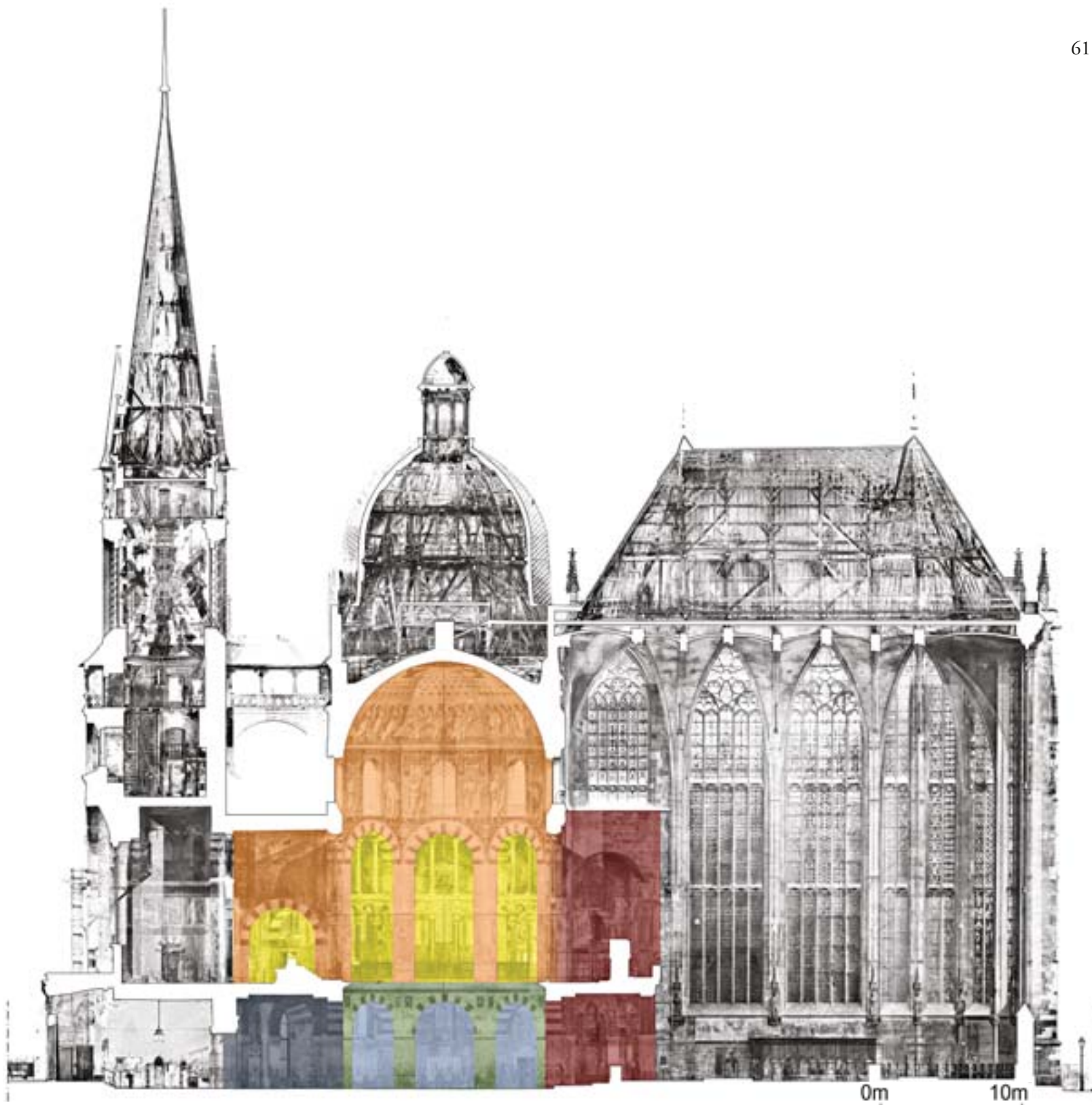
In realtà esse mostrano proprietà alquanto diverse. Quella del piano terra, infatti, presenta la classica impostazione centripeta di un edificio a pianta centrale dove sia le percorrenze che la qualità delle varie componenti spaziali concorrono a spingere l'attenzione dalla periferia verso il centro (fig. 8).

Nel caso specifico questo effetto è sapientemente accentuato tanto dalla bassa sezione in penombra dell'ambulacro (contrapposta allo smisurato e luminoso "pozzo" della cupola) quanto dalla continuità del soffitto anulare privo di risalti apprezzabili.

Al secondo piano, viceversa, lo spazio dell'ambulacro risulta fortemente discontinuo per

effetto dei massicci pilastri poligonali della corona interna e dei bassi archi che delimitano i vari settori voltati (fig. 9). Viene così a crearsi un ritmo marcato sia in pianta che in alzato in cui ambienti rettangolari affacciati sul vuoto centrale si alternano a spicchi triangolari sostanzialmente ciechi. Mentre gli uni assumono la veste di un tipico sistema di cappelle radiali, gli altri fungono di fatto da elementi di transizione capaci sia di connettere che di compartimentare i vari spazi. In questo schema, un osservatore che si affacci dall'anello superiore viene immediatamente "risucchiato" nel vuoto dell'ottagono riuscendo infine a trovare, solo dopo averlo scavalcato, un qualche approdo nella sezione diametralmente opposta dell'ambulacro. In questo senso la matrice percettiva del primo livello è caratterizzata da un marcato carattere centrifugo.

Lo spazio della Cappella Palatina si dimostra pertanto estremamente dinamico sotto la spinta delle tensioni contrapposte degli ambulacri che trovano solo nell'ottagono centrale una loro instabile composizione. Ma questo sofisticato carattere difficilmente può essere spiegato senza ammettere che la Cappella Palatina sia il prodotto di un programma estremamente chiaro nella mente del progettista che rigorosamente calibra il ruolo, la forma e il funzionamento delle varie componenti



architettoniche proprio in funzione del suo perseguimento. Di tale programma anche le unghie triangolari da cui siamo partiti (e a cui ritorneremo a breve) devono evidentemente essere in qualche modo parte.

Lunette

Sempre con l'obiettivo di valutare il grado di intenzionalità del progettista, il problema successivo da affrontare consiste allora nel verificare quali soluzioni tecniche un architetto dell'epoca avesse a disposizione e se e in quale misura tra queste rientrassero strutture basate sulla geometria del cono.

La copertura voltata di spazi a pianta triangolare non rappresenta di certo una novità nel quadro dell'architettura antica e medievale. Questo problema, di fatto, si presenta ogni qualvolta si abbia a che fare con quella famiglia di unghie a pianta triangolare dal cui assemblaggio deriva un vastissimo repertorio di apparati voltati.

Tipicamente, un'unghia presenta tre elementi principali (fig. 10): un arco (generalmente verticale) che insiste sulla base del triangolo di imposta e due curve di norma piane poste sui piani verticali che passano per i lati di detto triangolo. Le curve, comunemente

The space of the Palatine Chapel reveals itself to be very dynamic due to the thrust of the juxtaposed tensions of the ambulacra that achieve their instable composition only in the central octagon. However, it is difficult to explain this sophisticated feature without admitting that the Palatine Chapel is the result of an extremely clear plan in the mind of the designer who meticulously calibrates the role, form and function of the architectural components in order to achieve his goal. The triangular panels we initially mentioned (and will return to shortly) obviously have to somehow be part of this design.

8/ Il carattere centripeto dell'ambulacro al piano terra della Cappella Palatina (elaborazione di Carlo Bianchini).
The centripetal flow of the ambulatory on the ground floor of the Palatine Chapel (by Carlo Bianchini).

9/ Il carattere centrifugo dell'ambulacro al primo piano della Cappella Palatina (elaborazione di Carlo Bianchini).
The centrifugal flow of the ambulatory on the first floor of the Palatine Chapel (by Carlo Bianchini).



Lunettes

Continuing in our evaluation of the designer's intentions, the next aspect we needed to tackle was to verify the technical solutions available to a contemporary architect, and to what extent any structures based on the geometry of the cone were part of said solutions.

The vaulted ceiling of spaces with a triangular plan was certainly not a novelty

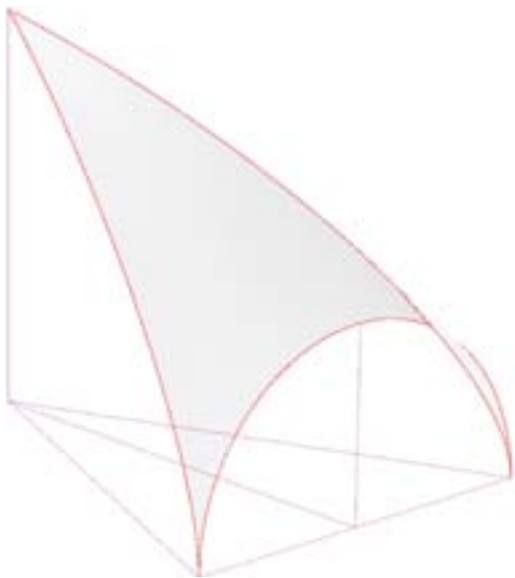
definite costoloni, si incontrano in un punto posto sulla verticale del vertice del triangolo d'imposta che dunque risulta anche il punto più alto della lunetta stessa. Questo schema si adatta a molte configurazioni diverse: a una comune volta a crociera, ad esempio, dove ciascuna unghia cilindrica risulta delimitata dal profilo del cilindro di cui fa parte e dai due semicostoloni che da esso salgono fino al cervello della volta. Ma anche a un caso

più complesso come quello che troviamo nell'ambulacro al piano terra della Cappella Palatina, in cui diverse unghie vengono adattate al mutevole andamento in pianta così da ricomporre uno spazio continuo almeno nei termini discussi nel paragrafo precedente (fig. 3 sinistra).

Se la geometria del perimetro delle unghie (arco, costoloni) è tutto sommato ricorrente, lo è meno quella della superficie risultante.



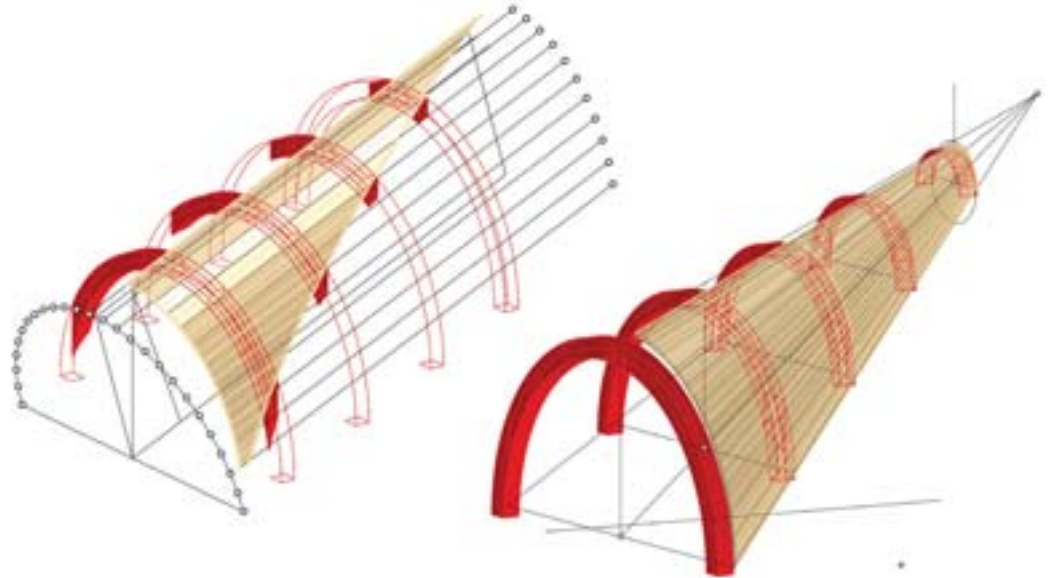
10/ Schema geometrico di una tipica unghia triangolare (elaborazione di Carlo Bianchini).
Geometric diagram of a typical triangular panel (by Carlo Bianchini).



11/ Schema di centinature di una lunetta sferoidica (a sinistra) e di un'unghia conica (a destra) (elaborazione di Carlo Bianchini).

Diagram of the centring of a spheroidal lunette (left) and a conical panel (right) (by Carlo Bianchini).

12/ Simulazione della copertura con una lunetta sferoidica del settore circolare della Cappella Palatina (elaborazione di Carlo Bianchini).
Simulation of the roof with a spheroidal lunette in the circular sector of the Palatine Chapel (by Carlo Bianchini).



Quest'ultima, infatti, se nel caso di una volta a crociera è rigorosamente cilindrica, in altri casi invece si presenta non immediatamente riconducibile a una primitiva standard. È questo il caso delle lunette sferoidiche che, come noto, traggono la loro aggettivazione dall'essere superfici a doppia curvatura e che per questo assomigliano più a una specie di sfera (sferoide appunto) che a un cilindro. Come ben sa chiunque abbia approcciato la costruzione con un modellatore 3D della superficie compresa tra arco e costoloni di una lunetta sferoidica, non esiste né una primitiva né un comando con i quali generare una soluzione che soddisfi tutti i vincoli (tangenze, curvature, continuità) che al contrario apprezziamo come naturali nell'osservare una lunetta ben fatta.

Ciò nondimeno, le unghie sferoidiche sono comunque riconducibili più alla geometria del cilindro che a quella della sfera: ma non in ragione di qualche pagina di un trattato sull'intersezione tra superfici, quanto piuttosto di quel sapere "pratico" che guida e sovrintende alla loro costruzione in cantiere dove, notoriamente, il discrimine non passa tanto dal rigore della soluzione adottata quanto dal suo livello di semplicità ed economicità.

In ossequio a questo principio, infatti, la costruzione di una lunetta sferoidica procede solitamente «disponendovi a traverso altrettante porzioni di centinature di volte a



botte adattate alle forme e alle dimensioni delle lunette» [Cavaliere San-Bertolo 1827]⁴. Tendenzialmente si "riciclano" dunque le

in ancient and medieval architecture. In fact, this problem had to be solved each time the design involved the group of triangular-plan

13/ Foto storica dell'apparecchiatura di uno degli spicchi triangolari, in alto (fotografia da Domschatzkammer Aachen); vista ravvicinata della tipologia muraria adottata nelle strutture carolingie della Cappella Palatina, in basso (foto di Carlo Bianchini).

Old photograph of one of the triangular wedges, top (photograph from Domschatzkammer Aachen); close-up of the wall type used in the Carolingian structures in the Palatine Chapel, bottom; (photograph by Carlo Bianchini).

panels which, when assembled, produce a very extensive repertoire of vaulted structures. A panel usually presents three main elements (fig. 10): an arch (usually vertical) resting on the base of the impost triangle and two generally flat curves placed on the vertical planes that pass through the sides of said triangle. The curves, commonly known as ribs, meet in a point on the vertical of the vertex of the impost triangle which, therefore, is also the highest point of the lunette. This schema can be applied to many different configurations: to a common groin vault, for example, where each cylindrical panel is delimited by the profile of the cylinder of which it is part and by the two semi-ribs that rise to the top of the panel. The schema can also be applied to a much more complex case, such as the one in the ambulatory on the ground floor of the Palatine Chapel, where several panels are adapted to the changing pattern in the plan, so as to recompose a continuous space, at least as concerns the terms discussed in the previous paragraph (fig. 3, left).

If the geometry of the perimeter of the panels (arch, ribs) is, all in all, recurrent, that of the ensuing surface is not. In fact, while in a groin vault the latter is strictly cylindrical, in other cases it is not immediately attributable to a standard primitive. This is the case of spheroidal lunettes; as we all know, the adjective spheroidal reflects the fact they have a double curvature surface and, for this reason, look more like a sort of sphere (spheroid) than a cylinder. As all those who have tried their hand at construction using a 3D modeller of the surface between the arch and the ribs of a spheroidal lunette, there is no primitive or command with which to generate a solution that satisfies all the constraints (tangencies, curvatures, continuities) which, on the contrary we appreciate as natural when we look at a well-built lunette.

Nevertheless, the spheroidal panels have more in common with the geometry of the cylinder than with that of the sphere: not because they are based on the page of a treatise focusing on the intersection between surfaces, but rather on the 'practical' knowledge that guides and oversees their construction on the worksite where the criterion is notoriously less linked to

centine circolari già disponibili in cantiere che potranno essere tutte uguali o di raggio decrescente mano a mano che ci si avvicina al vertice della lunetta (fig. 11, sinistra). Questa ottimizzazione nell'uso delle centine si trasferisce anche sulla costruzione del tavolato su cui poggia l'intradosso della volta che risulterà costituito da elementi rettangolari piani almeno da centina a centina. La lunetta "grezza" può dunque essere approssimata a una serie di sezioni cilindriche più o meno omogenee che saranno poi ricondotte alla continuità che comunemente apprezziamo mediante l'applicazione sapiente dello strato di finitura.



Questa soluzione rappresenta di fatto uno standard nella copertura di una lunetta triangolare e pertanto sarebbe stata la più probabile anche nel caso della Cappella Palatina (fig. 12). Tanto più nella prospettiva dei modelli come Santa Costanza a Roma, San Vitale a Ravenna o San Gereone a Colonia a cui la storiografia sostiene si possa essere ispirato l'architetto di Aachen.

Insieme alle questioni compositive già discusse, il fatto che ad Aachen troviamo invece applicata una soluzione diversa dallo standard rafforza anch'esso l'idea che essa derivi da una precisa volontà del progettista: in altre parole che non sia né casuale né frutto dell'applicazione di una regola consuetudinaria da parte delle maestranze in fase realizzativa.

L'esame delle strutture provvisorie necessarie a costruire una simile unghia conica ne è prova convincente (fig. 11, destra). Al di là delle questioni concernenti la preparazione delle maestranze in cantiere, scegliere la soluzione conica comporta infatti un aggravio non piccolo dal punto di vista costruttivo. Per prima cosa, il riciclo delle centine esistenti appare più complicato che nel caso della lunetta sferoidica al punto da potersi ritenere che ad Aachen sia stato realizzato una sorta di "kit" da utilizzare solo per quelle specifiche unghie. Analogamente complicata è la realizzazione del tavolato che sosterrà l'apparecchiatura della volta: in questo caso infatti gli elementi non sono più rettangolari ma trapezoidali divenendo addirittura triangolari a ridosso del vertice. Giova a questo proposito ricordare che le unghie della Cappella Palatina terminano proprio nel vertice del cono e che la superficie che vediamo oggi è geometricamente conforme al sottostante intradosso grezzo come testimoniato dalle foto storiche che mostrano un'apparecchiatura in pietra e giunti di malta simile a quello che troveremmo in una volta a mattoni (fig. 13). Da quanto illustrato possiamo dunque giungere alle seguenti conclusioni:

- la soluzione conica rappresenta una novità rispetto allo standard consolidato;
- essa non offre alcun vantaggio in termini di costruzione e anzi implica la realizzazione di centine ad hoc e una probabile "formazione"

14/ La soluzione conica del palazzo di Ardashir Pāpakan costruito nel sud dell'Iran all'inizio del III secolo (foto: Aliparsa - Own work, Public Domain, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2008229>>; Атаман Павлюк - Own work, CC BY-SA 3.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22649035>>; <https://madainproject.com/palace_of_ardashir>).

The conical solution used in the Palace of Ardashir Pāpakan built in southern Iran in the early 3rd century (photographs: Aliparsa - Own work, Public Domain, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2008229>>; Атаман Павлюк - Own work, CC BY-SA 3.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22649035>>; <https://madainproject.com/palace_of_ardashir>).

wikimedia.org/w/index.php?curid=2008229>; Атаман Павлюк - Own work, CC BY-SA 3.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22649035>>; <https://madainproject.com/palace_of_ardashir>).



ex-novo delle maestranze che abitualmente risolvono il problema in altro modo. Entrambe le considerazioni rafforzano l'ipotesi che le unghie coniche siano il frutto di una decisione propria del progettista che forse si trova addirittura a imporla alle maestranze notoriamente riluttanti a intraprendere lavorazioni più onerose, più costose e per le quali comunque non possano vantare una consolidata esperienza.

La pista armena

Rimane fuori da questi ragionamenti un aspetto fondamentale: da dove proviene questa inedita soluzione?

A questo proposito la storia dell'architettura tardo-antica e alto-medievale non è prodiga di tracce e quelle che emergono con maggiore facilità non appaiono molto rilevanti in questo caso⁵. Ciò nondimeno, siamo in qualche modo riusciti a rintracciare una sequenza che sembra legare alcune strutture coniche (se non uguali assimilabili al caso di Aachen) a un sapere costruttivo che Odone di Metz potrebbe aver conosciuto e quindi applicato originalmente nella Cappella Palatina.

L'infruttuosa ricerca bibliografica e documentale che ha abbracciato con particolare cura l'architettura occidentale dal I al X secolo ci ha infatti costretto ad allargare il campo di indagine e quindi a percorrere strade non immediatamente evidenti quando non addirittura preliminarmente scartate.

Abbandonato (almeno temporaneamente) il lavoro in biblioteca, la prima fase di questa

ricerca piuttosto erratica mirava a identificare innanzi tutto strutture coniche in qualche modo simili a quelle di Aachen sondando sistematicamente pagine e database disponibili sul web.

A fronte di innumerevoli risultati non rilevanti, una pagina Wikipedia⁶ (sì, proprio Wikipedia...) ha infine catturato la nostra attenzione poiché conteneva la foto di una struttura conica orizzontale utilizzata come sostegno/raccordo angolare di una cupola in pietra impostata su pianta quadrata. Si trattava della pagina dedicata alle cosiddette *squinches* ossia a quella tipologia di volte non certo sconosciuta e spesso impiegata in diverse costruzioni di epoca romanica⁷ che in italiano vanno sotto il nome di volte o pennacchi a tromba.

Tuttavia l'edificio ritratto (fig. 14), corrispondente al Palazzo di Ardashir Pāpakan costruito nel sud dell'Iran all'inizio del III secolo, se da un lato costituiva un primo, chiaro esempio di struttura antecedente assimilabile geometricamente e costruttivamente a quella di Aachen, dall'altro non lasciava molto spazio alla speranza quanto a un collegamento con la Cappella Palatina data la considerevole distanza sia temporale che geografica.

Ciò nondimeno, lavorando ancora sull'area medio-orientale sono successivamente emersi più di un esempio di chiese con pennacchi a tromba utilizzati come raccordo tra il quadrato della crociera e l'imposta ottagonale della cupola sovrastante. Alcune di queste erano databili intorno all'VIII secolo e si trovavano nell'area dell'antica Armenia⁸ (fig. 15).

the strictness of the adopted solution, but more to its level of simplicity and cost-effectiveness. In fact, according to this principle, the construction of a spheroidal lunette normally proceeds "by placing crosswise the same number of portions of barrel vault centring adapted to the forms and dimensions of the lunettes" [Cavalieri San-Bertolo 1827].⁴ The tendency is to 'recycle' the circular centring already available at the worksite; they can either all be the same, or have a decreasing radius the closer they are to the vertex of the lunette (fig. 11, left). This optimised use of centring is also adopted to build the planking supporting the intrados of the vault, which is made up of flat rectangular elements, at least from centring to centring. The 'rough' lunette can be likened to a series of more or less homogeneous cylindrical sections which are then turned into the seamless surface we see after the finishing layer is skilfully applied. This solution is in fact a standard applied to the ceiling of a triangular lunette and would therefore be the most probable, also in the Palatine Chapel (fig. 12). All the more so in the perspective of the models such as Santa Costanza in Rome, San Vitale in Ravenna or San Gereon in Cologne; historiography believes that the latter could have inspired the architect in Aachen.

Apart from the compositional issues discussed earlier, the fact that a non-standard solution was used in Aachen also reinforces the idea that this was exactly what the designer intended. In other words, it is neither random nor the outcome of a conventional rule applied by the workmen during construction.

One convincing piece of evidence was discovered after examining the temporary structures required to build this kind of conical panel (fig. 11, right). Apart from issues regarding the expertise of the labourers employed on the worksite, choosing the conical solution involves a quite hefty additional burden as regards its construction. First of all, recycling existing centring is more complicated than for the spheroidal lunette; so much so that we believe a sort of 'kit' was created in Aachen and used only for those panels. Constructing the planking that was to support the stonework of the vault was

15/ Alcuni esempi di pennacchi a tromba nelle chiese armene di Odzun (a sinistra) e di S. Astvatsatsin a Talin (a destra) databili intorno al VII secolo (foto: Rita Willaert - <<https://www.flickr.com/photos/rietje/2931193595/>>, CC BY 2.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6950747>>; Nina Stoessinger - <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Talin_chapel.jpg>, CC BY-SA 2.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7848693>>).

Some examples of squinches in the Armenian churches of Odzun (left) and of S. Astvatsatsin in Talin (right) both going back to the VII century CE (pictures: Rita Willaert - <<https://www.flickr.com/photos/rietje/2931193595/>>, CC BY 2.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6950747>>; Nina Stoessinger - <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Talin_chapel.jpg>, CC BY-SA 2.0, <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7848693>>).

just as complicated; in fact, in this case the elements are no longer rectangular but first trapezoidal and then triangular close to the vertex. We should mention that the panels in the Palatine Chapel end in the vertex of the cone, and that the surface we see today is geometrically compliant with the rough intrados underneath. In fact, old photographs show stonework and mortar joints similar to the ones found in a brick vault (fig. 13).

From the information provided here we can reach the following conclusions:

- the conical solution is a novelty compared to the consolidated standard;

- it provides no advantages in terms of construction, on the contrary it required building ad hoc centring and a probable, completely new kind of 'training' of the workmen who usually used a different solution to solve the problem.

Both considerations reinforce the hypothesis that the conical panels were a personal decision by the designer who perhaps had to impose it on the workmen, famous for being reluctant to undertake more burdensome and more expensive work because they were unable to boast that they had long-accrued experience in this matter.

The Armenian trail

One crucial aspect is not part of our reasoning: what inspired this unusual solution?

On this issue, the history of late-ancient and early-medieval architecture provides very few clues, and the ones that emerge more easily do not appear to be relevant in this case.⁵

Nevertheless, we somehow managed to track down a sequence that appears to link several conical structures (that are not identical, but similar to those in Aachen) to the knowledge about construction that Odo of Metz may have been familiar with – something he then applied in an original manner in the Palatine Chapel.

Our unsuccessful bibliographical and documentary research focusing in particular on western architecture from the 1st to the 10th century forced us to broaden our field of investigation, spreading out in directions that were either not immediately obvious, or had been previously dismissed.

Tali strutture mostravano pertanto una in-dubbia compatibilità temporale con le volte di Aachen ma soprattutto suggerivano finalmente una connessione credibile con Odone da Metz.

Infatti, nel quadro della fondata ipotesi di un'influenza armena su alcune costruzioni dell'VIII secolo presenti in Europa occidentale [Gilbert 1964; Henry 1965], più di uno studioso sostiene che Odone stesso avesse origini armene [Dézélys 1989; Chevalier 2019; Yevadian 2020; Guréghian 2020] sebbene una tale provenienza non pare potersi affermare con assoluta certezza [Keuerleber 2014; Chevalier, 2019].

Con tutte le precauzioni del caso, dunque, prende corpo un'intrigante suggestione: l'armeno Oton Matsaetsi a noi noto come Odone

da Metz, progettista della Cappella Palatina, essendo a lui nota la soluzione del raccordo a tromba o per esperienza diretta o in quanto elemento del background tecnico-formale derivante dalla sua cultura architettonica originaria, sceglie di utilizzarla "creativamente" per risolvere il problema dell'ambulacro di Aachen.

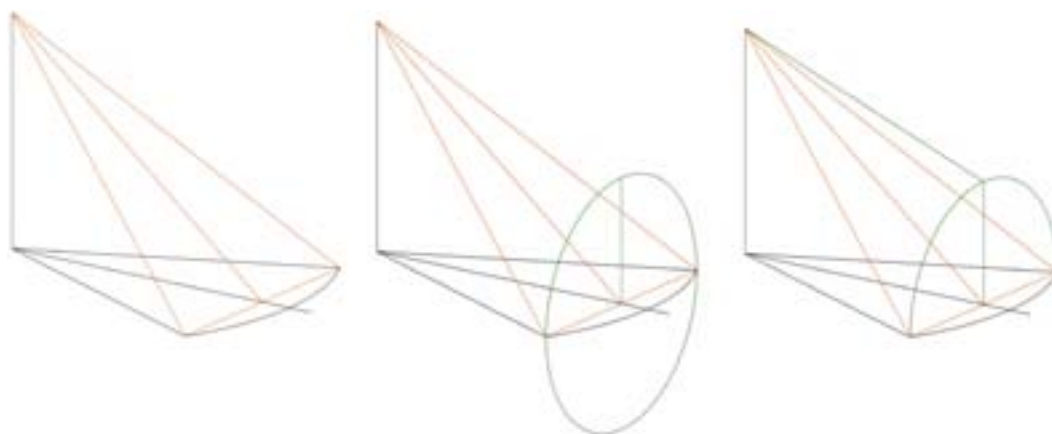
Questa possibilità, oltre a essere coerente con quanto discusso finora circa la piena consapevolezza del progettista, potrebbe suggerire che Odone abbia deciso addirittura di "citare" in questo modo uno stilema a lui caro.

Tuttavia, l'adattamento necessario per trasformare una volta a tromba nelle unghie di Aachen non è certo di poco conto sia dal punto di vista compositivo che costruttivo. Quanto al primo aspetto, la volta della



16/ Gli elementi geometrici fondamentali
nella trasformazione di un pennacchio a tromba
nella volta conica della Cappella Palatina
(elaborazione di Carlo Bianchini).

*The fundamental geometric elements used to transform
a squinch in the Palatine Chapel (by Carlo Bianchini).*



Cappella Palatina oltre a essere rampante è per così dire “montata al contrario” rispetto al classico pennacchio a tromba dato che il vertice del cono punta verso il centro e non verso l'esterno della fabbrica. Tuttavia è l'aspetto puramente geometrico ad apparire più interessante.

Se da un lato possiamo semplicemente considerare la volta della Cappella Palatina come una versione inclinata di un pennacchio a tromba (fig. 16), dall'altro non possiamo ignorare come questa modifica comporti una serie di complicazioni geometriche che male si conciliano con quello che, sulla base delle scarsissime fonti scritte disponibili, tradizionalmente la storiografia ritiene essere il livello del sapere geometrico occidentale tra il VII e VIII secolo [Chasles 1837; Beaujourn 1966; Boyer 1968] e in particolare quello presumibilmente noto nell'ambito della corte carolingia [Butzer 1982, Butzer 1995].

Illuminante è a questo proposito la definizione di cono proposta da Isidoro da Siviglia nelle sue celeberrime *Etimologie* redatte all'inizio del VII secolo e che costituiscono una delle opere di riferimento per la geometria e le altre materie che componevano il cosiddetto *quadrivium*⁹ in epoca alto-medioevale (fig. 17): «Il cono è una figura larga alla base e stretta alla sommità, come l'orthogonion»¹⁰.

Se dunque l'opera scritta fosse realmente corrispondente alle conoscenze disponibili all'epoca di Odone, allora le volte coniche della Cappella Palatina, per complessità e raffinatezza, risulterebbero sostanzialmente

inspiegabili. La loro superficie, infatti, implica una piena padronanza delle relazioni tra vertice, direttrice e rette generatrici di un cono che, tra l'altro, non è circolare retto. Informazioni queste ampiamente disponibili nei trattati dell'antichità classica ma di cui non si percepisce nemmeno l'eco sia nell'opera di Isidoro che in quella precedente tradizionalmente attribuita a Boezio¹¹ o nella posteriore *Geometria Gerberti* di Gerberto d'Aurillac¹² [Olleris 1867; Bianchini, Senatore 2015].

In questo senso, più che con la letteratura del tempo, l'unghia della Cappella Palatina suggerisce una qualche affinità con l'opera di Euclide o con il Trattato sulle Coniche di Apollonio di Perga, testi però entrambi sconosciuti alla cultura geometrica occidentale almeno secondo la narrazione prevalente.

In questo quadro, anche se l'ipotesi che Odone da Metz possa in qualche modo essere venuto in contatto con qualcuna di queste opere è suggestiva ma poco credibile in assenza di ulteriori evidenze documentali, non possiamo ignorare che la geometria che “leggiamo sulle pietre” di Aachen non è spiegabile accettando ciò che troviamo nei libri che raccontano la sua storia.

Il caso di Aachen rafforza a nostro avviso la teoria che intravede nella cosiddetta geometria pratica medievale sia quel *corpus* di costruzioni necessarie a risolvere problemi in molti settori cruciali per qualunque società mediamente organizzata (fondiario, edilizio, urbano, legale, militare), sia un “luogo” dove in Europa occidentale la geometria abbia potuto non solo

Having (at least temporarily) abandoned work in the library, the first stage of this rather erratic research focused on finding conical structures that were fairly similar to the ones in Aachen; so we systematically searched and studied pages and databases available on the internet.

After countless unsuccessful results, a page on Wikipedia⁶ (yes, really, Wikipedia...) caught our attention because it contained a photograph of a horizontal conical structure used either to support, or as a corner joint of, a stone dome resting on a square plan. It was the page dedicated to so-called squinches, in other words a type of vault which is certainly not unknown and was often used in several Romanic buildings⁷; in Italian it goes by the name of volte or pennacchi a tromba (squinches or pendentives).

The building displayed in Wikipedia (fig. 14) was the Palace of Ardashir Pāpakan, built in southern Iran in the early 3rd century. However, if on the one hand it was the first, clear example of an earlier structure, geometrically and constructively similar to the one in Aachen, on the other there was little hope we could link it to the Palatine Chapel, given the considerable temporal and geographical distance between them.

Nevertheless, by continuing to focus on the Middle East we did find several examples of churches with squinches used to join the square of the cross vault with the octagonal impost of the dome above. Some of these examples date to roughly the 8th century and can be found in ancient Armenia⁸ (fig. 15).

These structures were undoubtedly temporally compatible with the vaults in Aachen, but above all they finally provided a credible link to Odo of Metz.

In fact, as part of the well-founded hypothesis of an Armenian influence on several 8th-century buildings in Western Europe [Gilbert 1964; Henry 1965], more than one scholar maintains that Odo himself had Armenian roots [Dézélys 1989; Chevalier 2019; Yevadian 2020; Guréghian 2020] even if this cannot be stated with absolute certainty [Keuerleber 2014; Chevalier, 2019].

An intriguing idea emerges, albeit with all the necessary precautions: the Armenian Oton

17/ Pagina delle Etimologie di Isidoro da Siviglia dedicata al cono. Cerchiata in rosso la figura corrispondente al testo (elaborazione di Carlo Bianchini su immagine da <<https://www.e-codices.unifr.ch/it/list/one/csg/0576>>).
A page of the *Etymologiae* by Isidore of Seville dedicated to the cone. The figure corresponding to the text is circled in red (by Carlo Bianchini on an image from <<https://www.e-codices.unifr.ch/it/list/one/csg/0576>>).

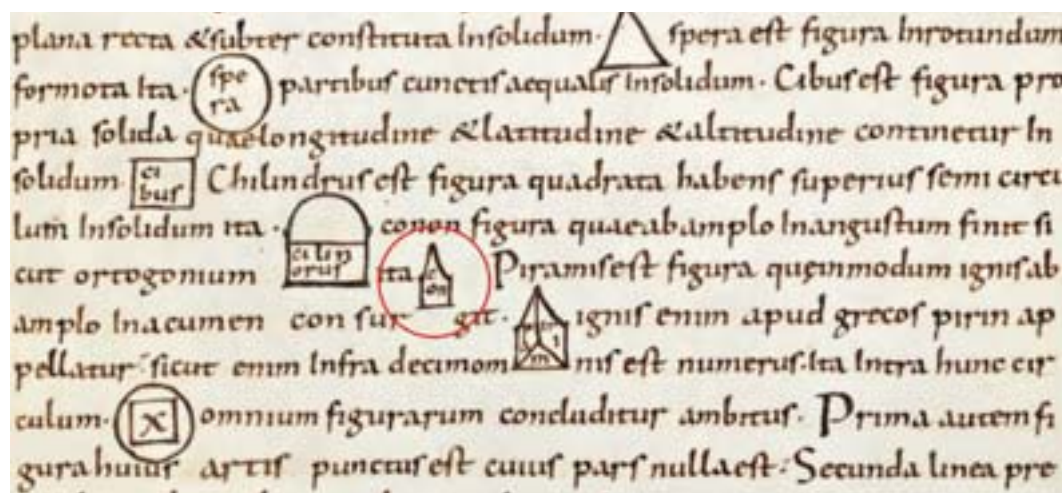
Matsaetsi, who we know as Odo of Metz, designer of the Palatine Chapel, was aware of the solution of the conical joint, either through his own first-hand experience or as an element in his technical-formal background of knowledge, influenced by his original architectural culture, and so he chose to use it 'creatively' in order to solve the problem of the ambulatory in Aachen.

This possibility is not only in line with what we have so far discussed about the designer's awareness, it would also indicate that Odo decided to use this method in order to 'cite' a stylistic element dear to his heart.

However, turning a conical vault into the panels in Aachen is undoubtedly no mean feat from the point of view of their composition and construction. As regards the former, the vault of the Palatine Chapel is not only rampant, but, so to speak, 'assembled back to front' compared to classical squinches, given that the vertex of the cone points to the centre and not towards the building's exterior. Notwithstanding, it is the purely geometric aspect that is the most interesting.

If, on the one hand, we can simply consider the vault of the Palatine Chapel as an inclined version of a squinch (fig. 16), on the other, we cannot ignore how this alteration involves a series of geometric complications that are inconsistent with what – on the basis of the very scant written sources available – historiography traditionally believes to be the level of western geometric thinking between the 7th and 8th century [Chasles 1837; Beaujourn 1966; Boyer 1968] and, in particular, the thinking presumably known by the Carolingian court [Butzer 1982; Butzer 1995].

Isidore of Seville provides a very enlightening definition of cone in his very famous *Etymologiae* written in the early 7th century. The volume is one of the reference works for geometry and the other subjects that made up the so-called *quadrivium*⁹ in the early Middle Ages (fig. 17): "the cone is a figure that from a wide base narrows at the top, like the orthogonium"¹⁰. So, if the written work really did correspond to the knowledge available when Odo was alive, then the complexity and elegance of the conical vaults of the Palatine Chapel would be essentially inexplicable. In fact,



conservarsi ma anche continuare a evolvere [Bianchini 1995a; Bianchini 1995b].

Le volte coniche della Cappella Palatina sembrano in effetti costituire un primo, solido inizio di questo processo che, tuttavia, è ben lungi dall'essere enucleato e inserito nel quadro dello sviluppo del pensiero geometrico occidentale. Le ragioni che non hanno finora consentito questa possibile revisione sono in parte ideologiche ma soprattutto di ordine metodologico per ciò che attiene alla natura delle fonti. È infatti evidente come la storiografia tradizionale abbia assunto l'analisi di quelle scritte come elemento guida nel delineare la storia della geometria medioevale quando probabilmente esse non rappresentano che parzialmente un contesto culturale molto più articolato dove la raccolta e la comunicazione del sapere era affidato prevalentemente a insegnamenti orali e apprendistato. Se si accetta quest'ipotesi come ragionevole (e le volte di Aachen spingono in questa direzione) allora esiste davvero una storia della geometria medievale alternativa che non è scritta sulla pergamena ma sulla pietra e che aspetta di essere svelata anche grazie agli strumenti di misura, modellazione e simulazione che abbiamo oggi a disposizione.

Conclusioni

Lungi dall'affermare verità incontrovertibili, quanto fin qui illustrato intende semplicemente proporre alla comunità scientifica alcune ipotesi che spetterà ad altri valutare e forse confutare.

La prima è che il progetto della Cappella Palatina sia unitario, sostanzialmente olografo e rigorosamente controllato in tutte le fasi, dalla progettazione alla realizzazione. Questo suggerisce l'esistenza di un unico progettista dotato di forte autonomia che al momento risponde al nome di Odone da Metz.

Inoltre, l'analisi compositiva della fabbrica identifica alcuni elementi con caratteri originali (quando non addirittura innovativi) come testimonia il rapporto dinamico tra la cintura degli ambulatori e il vuoto dell'ottagono centrale. Quella del primo livello, in particolare, è caratterizzata dall'alternanza di settori quadrangolari aperti e cunei triangolari ciechi dove questi ultimi risultano "stranamente" voltati con unghie coniche.

Per questa anomalia sia compositiva che costruttiva è stato tuttavia possibile individuare un riferimento coevo nell'architettura di matrice armena che, unita all'ipotesi storiografica che propone un'analoga origine anche per Odone da Metz, sembra in qualche modo chiudere il cerchio: Odone, architetto di non comuni capacità, progetta unitariamente la Cappella Palatina introducendo elementi di provenienza romana e bizantina senza omettere tuttavia di citare la sua cultura di appartenenza. In questo processo Odone dimostra non solo di padroneggiare le forme architettoniche ma anche di possedere conoscenze che non paiono corrispondenti al livello che tradizionalmente la storiografia attribuisce alla geometria del periodo.

Lo studio che abbiamo presentato concorre forse a gettare nuova luce su un edificio certamente tra i più studiati della storia ma che, come ogni capolavoro che si rispetti, continua a serbare gelosamente molti dei suoi segreti. A volte però, quando si ha un po' di fortuna, può serbare anche qualche sorpresa.

1. Quest'attività fa parte di un vasto progetto internazionale di ricerca che vede coinvolti Sapienza Università di Roma, la Robert Gordon University di Aberdeen, la RWTH Aachen University in partnership con la Dom-bauhütte della Cattedrale di Aachen. Mediante l'utilizzo di tecnologie particolarmente avanzate, obiettivo del progetto è la documentazione il più possibile completa degli edifici che la compongono come pure dei loro materiali costitutivi. Il gruppo di ricerca è costituito da Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Guglielmo Villa, Martina Attenni, Marika Griffo, Roberto Barni (Sapienza) e Douglas Pritchard (Robert Gordon University), Yannick Ley (RWTH Aachen). Da segnalare, infine, che il progetto è co-finanziato nel quadro del PNRR, Partenariato Esteso 5 "CHANGES", Spoke 8, Linea Tematica 1 Produzione, organizzazione e comunicazione della conoscenza coordinata dal prof. Carlo Bianchini.

2. In realtà la superficie non si interrompe all'intersezione con l'arco che funge da direttrice ma prosegue fino a incontrare la superficie cilindrica verticale che costituisce il limite esterno della Cappella Palatina. Tale intersezione genera come noto una curva sghemba peraltro correttamente visibile come terminale della volta conica di Aachen. L'analisi di questa intersezione esula però per motivi di spazio dal presente articolo.

3. Di questo personaggio si hanno pochissime notizie fatta eccezione per la seguente iscrizione datata intorno al X secolo rinvenuta intorno alla cupola: «*Insignem hanc dignitatis aulam Karolus caesar magnus instituit; egregius Odo magister explevit, Metensi fotus in urbe quiescit*». È opinione comune, comunque, che sia stato Odone l'architetto della Cappella Palatina e che lo stesso Carlo Magno possa aver avuto un ruolo importante.

4. Ecco la citazione completa: «L'armamento delle volte a crociera, e delle volte a lunette, esige una struttura sostanzialmente uguale a quella d'una volta a botte, dovendosi adattare cotale armatura alla botte principale, che nelle volte lunulate e unica, e non può confondersi con alcun'altra, e nelle volte a crociera può ravvisarsi indistintamente nell'una o nell'altra delle due botti componenti. Fabbricata la centinatura della botte principale, conviene applicare sul dorso di questa le centinature delle lunette, o dell'altre due falde della crociera, disponendovi a traverso altrettante porzioni di centinature di volte a botte adattate alle forme e alle

dimensioni delle lunette, ovvero delle dette due falde trasversali della crociera» (cfr. Cavalieri San-Bertolo 1826-1827, pp. 144-145).

5. A ben vedere, l'unica traccia di volte coniche che abbiamo trovato ha in qualche modo a che fare con i vomitoria degli anfiteatri. Tuttavia queste strutture appaiono molto più simili, anche costruttivamente, a una volta a botte che abbia uno dei due profili terminali più piccolo dell'altro tanto da potersi considerare una sorta di variante di una comune volta a botte rampante.

6. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Squinch>>.

7. Ad esempio nella chiesa di San Cataldo a Palermo.

8. Tra queste vale la pena di citare: la chiesa e il monastero di Odzun (V-VII secolo, provincia armena di Lori) e la cattedrale di Mren (VII secolo, regione di Kars, nell'attuale Turchia).

9. Riprendendo probabilmente l'impostazione di Marziano Mineo Filice Capella, Boezio tramanda uno schema che perdurerà per gran parte del Medioevo e che prevede la suddivisione delle sette *artes liberales* in due gruppi di discipline, di cui il primo, propedeutico, è costituito da Grammatica, Retorica e Dialettica (*Trivium*), e il secondo, per così dire di "specializzazione", comprende Aritmetica, Musica, Geometria ed Astronomia (*Quadrivium*).

10. *Conon, figura quae ab amplo in angustum finit, sicut orthogonium* (*Etimologie*, Libro III, Delle Figure geometriche).

11. Personaggio sensibile e attento alle problematiche filosofiche, etiche e politiche del suo tempo, Anicio Manlio Severino Boezio (475-525) è generalmente noto per l'opera *Philosophiae consolatio*. Egli riveste tuttavia un ruolo di importanza cruciale anche nello sviluppo della geometria medievale, in virtù di uno scritto "minore" intitolato *Boetii quae fertur geometria*, contenente gli enunciati privi di dimostrazione di alcuni tra i più semplici teoremi dei primi quattro libri degli *Elementi* di Euclide.

12. Quest'opera può essere considerata come il primo serio tentativo di raccogliere organicamente il sapere geometrico al volgere del primo millennio riformulandolo in accordo con le esigenze sia didattiche che pratiche di allora. La struttura dell'opera sarà per questo destinata a influenzare tutti i trattatisti successivi, tanto per seguire il suo schema che per contraddirlo. Per quanto riguarda il suo contenuto, esso sembra derivare in buona misura dal *Corpus Agrimensorum* che Gerberto ha occasione di studiare durante il suo soggiorno nell'Abbazia di Bobbio; non si possono tuttavia escludere influenze del pensiero arabo, che il nostro autore ben conosce in virtù del periodo trascorso in Spagna, del quale però non si hanno prove certe.

their surface requires absolute mastery of the relationships between the vertex, directrix and generating lines of a cone which, amongst other things, is not a right circular cone. This information was widely available in classical ancient treatises, but there is no echo of it in Isidore's work, or in the earlier work traditionally attributed to Boethius,¹¹ or in the much later Geometria Gerberti by Gerberto d'Aurillac¹² [Olleris 1867; Bianchini, Senatore 2015].

In this regard, the panel in the Palatine Chapel would appear to be more similar in nature to what Euclid writes in his Elements or the issues discussed by Apollonius of Perga in his Treatise on Conic Sections rather than to the literature available during that period. However, according to prevailing narrative, western geometric culture was unfamiliar with these texts.

Given the above, it is fascinating, but not very credible (due to a lack of documentary evidence) to hypothesise that Odo of Metz could have somehow come into contact with one of these works; however, we cannot overlook the fact that the geometry we 'read on the stones' in Aachen cannot be explained by simply accepting at face value what we find in the books that narrate its history.

We believe Aachen reinforces our theory that considers the so-called practical geometry used in the Middle Ages to be not only the corpus of constructions used to solve problems in many crucial sectors (land, building, urban, legal, military) for any moderately organised society, but also a 'place' where geometry in western Europe was able to be preserved and continue to evolve [Bianchini 1995a; Bianchini 1995b].

The conical vaults in the Palatine Chapel effectively look like a solid, early sign of this process which, however, is far from being enucleated and inserted in the framework of the development of western geometric thinking. The reasons that have so far hindered this possible revision are partly ideological, but above all methodological and involve the nature of the sources.

In fact, it is obvious that traditional historiography considered the analysis of those writings as a guiding element when outlining the history of medieval geometry; instead they

probably represent only a part of the much more multifaceted cultural context during which the gathering and communication of knowledge was chiefly entrusted to oral teachings and apprenticeship. If we believe this hypothesis to be reasonable (and the vaults in Aachen point in this direction) then an alternative history of medieval geometry exists, one which is not written in parchment but on stone. A history waiting to be revealed thanks also to the measurement, modelling and simulation tools available today.

Conclusions

Far from affirming incontrovertible truths, our intention is to simply draw the attention of the scientific community to several hypotheses illustrated in this paper; it is for others to evaluate and perhaps confute them. The first is that the Palatine Chapel was built based on a unitary project, essentially holographic and meticulously controlled throughout, from its design to its construction. This suggests that there was only one fiercely independent designer who, at the moment, corresponds to Odo of Metz.

In addition, the compositional analysis of the building has identified several original (and sometimes innovative) elements, testifying to the dynamic relationship between the ring of the ambulatory and the empty space of the central octagon. On the first floor, in particular, there is an alternating pattern of open quadrangular sectors and blind triangular wedges; the latter are 'unusual' insofar as their vaults have conical panels. We were, however, able to identify a contemporary reference for this anomalous composition and construction: Armenian architecture which, combined with a historiographical hypothesis that proposes similar roots for Odo of Metz, appears to somehow come full circle. Odo, an architect with remarkable skills, single-handedly designed the Palatine Chapel, introducing Roman and Byzantine elements, but without forgetting his own native culture. This process shows that Odo not only mastered architectural forms, but also displayed a knowledge far beyond that historiography traditionally attributes to the geometry of that period.

The study presented here perhaps helps to shed new light on a building that is amongst the most studied in history, but which, like every self-respecting masterpiece, continues to jealously conceal many of its secrets.

Sometimes, however, with a little luck, it can also reveal a few surprises.

Translation by Erika Young

1. This study is part of a broader international research in which several partners were involved: Sapienza Università di Roma, Robert Gordon University, Aberdeen, and RWTH Aachen University, together with the Dombauhütte of Aachen Cathedral. Using particularly advanced technologies, the objective of the project was to gather the most comprehensive documentation possible about the buildings that make up the complex, as well as the materials used in their construction. The research group was as follows: Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Guglielmo Villa, Martina Attenni, Marika Griffò, and Roberto Barni (Sapienza), Douglas Pritchard (Robert Gordon University), and Yannick Ley (RWTH Aachen). Finally, it is worth noting that the project is co-funded within the framework of the NRRP, Extended Partnership 5 'CHANGES', Spoke 8, Thematic Line 1: Production, Organization, and Communication of Knowledge, coordinated by Prof. Carlo Bianchini.

2. In actual fact the surface does not stop when it intersects the arch that acts as a directrix, but continues until it comes to the vertical cylindrical surface that is the outer limit of the Palatine Chapel. This intersection generates, as we know, a 'non-flat' curve that is visible to the naked eye, and acts as the terminal part of the conical vault in Aachen. For reasons of space, the analysis of this intersection is not discussed in this paper.

3. Little is known about this figure, except for the following inscription dating to roughly the 10th century and found written around the dome: "Insignem hanc dignitatis aulam Karolus caesar magnus instituit; egregius Odo magister explevit, Metensi fatus in urbe quiescit". The common view is that it refers to Odo as the architect of the Palatine Chapel and that Charlemagne could have played an important role.

4. This is the complete citation: "The framing of cross vaults, and lunette vaults, requires a structure that is basically the same as that of a barrel vault, since this frame has to be adapted to the main barrel vault, which in lunette vaults is unique, and cannot be confused with any other, and in cross vaults can be identified indistinguishably in one or the other of the two component barrel vaults. When building the centring of the main barrel vault, the centring of the lunettes or the other two pitches of the cross vault should be applied to the

back of this centring, placing across it the same number of portions of the centring of barrel vaults adapted to the forms and dimensions of the lunettes, in other words of the two transversal pitches of the cross vault" (cfr. Cavalieri San-Bertolo 1826-1827, pp. 144-145).

5. In actual fact, the only evidence we found of conical vaults is somehow linked to the vomitoria of amphitheatres. However, these structures appear to be more similar, including from a construction point of view, to a barrel vault with one springing end smaller than the other, so much so it can be considered a sort of variant of an ordinary rampant barrel vault.

6. <<https://en.wikipedia.org/wiki/Squinch>>.

7. For example, in the Church of San Cataldo in Palermo.

8. Of all these buildings, it is worth mentioning: the church and monastery in Odzun (5-7th century, Lori Province of Armenia) and the Cathedral in Mren (7th century, region of Kars, located in what is now Turkey).

9. Probably returning to the approach by Marziano Mineo Filice Capella, Boethius handed down a layout that was to last throughout most of the Middle Ages and involved dividing the seven artes liberales into two disciplinary groups; the first, preparatory, included Grammar, Rhetoric and Dialectics (Trivium), while the second, so to speak "specialisation", included Arithmetic, Music, Geometry and Astronomy (Quadrivium).

10. Conon, figura quae ab amplo in angustum finit, sicut orthogonium (Etymologiae, Book III, De Quator disciplinis mathematicis).

11. Anicius Manlius Severinus Boethius (475-525) was a sensitive figure who focused on the philosophical, ethical and political problems of his age; he is generally known for his book entitled *Philosophiae consolatio*. However, he also played a crucially important role in the development of medieval geometry in virtue of his 'less important' book – *Boetii quae fertur geometria* – in which he provides undemonstrated statements regarding some of the simplest theorems in the first four books of Euclid's *Elements*.

12. This book can be considered as the first serious attempt to organically collate geometric knowledge at the end of the first century, reformulating it based on the didactic and practical requirements of that age. This is why the book's structure was to influence all future treatise writers; they either followed his layout or argued with it. As concerns its contents, most of it appears to have been inspired by the *Corpus Agrimensorum* that Gerberto was able to study while staying in the abbey in Bobbio; however we cannot rule out that Arab thinking also influenced him, because he became familiar with it while he stayed for a period in Spain, although no reliable evidence of this is available.

References

- Attenni et al. 2023 = Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffio, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa. The vaulting system of the Palatine Chapel: The Aachen Cathedral World Heritage Site Documentation Project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 119-128. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-119-2023>>.
- Beaujouan 1966 = Guy Beaujouan. La science dans l'Occident médiéval chrétien. In René Taton (sous la dir. de). *Histoire générale des sciences. La science antique et médiévale (des origines à 1450)*. Parigi: P.U.F., 1966, pp. 582-652.
- Bianchini 1995a = Carlo Bianchini. Conservazione e sviluppo delle conoscenze geometriche durante il medioevo: il ruolo della Geometria Pratica. *XY*, 21, 1995, pp. 55-59. ISSN: 2499-8338. <https://www.xydigital.it/images/rivista/pdf/21-22_XY/N21-22_55-56.pdf>.
- Bianchini 1995b = Carlo Bianchini. Tecniche medievali di rilevamento. *Disegnare. Idee Immagini*, 9/10, 1995, pp. 21-28. ISSN: 1123-9247. <https://dsdra.web.uniroma1.it/sites/default/files/Disegnare%209-10_1994-1995.pdf>.
- Bianchini, Senatore 2015 = Carlo Bianchini, Luca James Senatore. Gerbert of Aurillac (c. 940-1003). In Michela Cigola (ed.). *Distinguished Figures in Descriptive Geometry and Its Applications for Mechanism Science: From the Middle Ages to the 17th Century*. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 33-51. ISBN: 9783319201986. <https://www.academia.edu/16404479/Gerbert_of_Aurillac_c_940_1003_>.
- Bosman 2012 = Lex Bosman. Crossing borders around 800: Charlemagne's Palatine Chapel at Aachen. In H. Heynen, J. Gosseye (eds). *Proceedings of the 2nd International Conference of the European Architectural History Network* (Brussels, 31 May-2 June 2012). Brussel: Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten, 2012, pp. 214-216. ISBN: 9789065691026.
- Boyer 1968 = Carl B. Boyer. *A History of Mathematics*. John Wiley, 1968. ISBN: 9780471093749.
- Buchkremer 1955 = Josef Buchkremer. Der Dom zu Aachen. *Beiträge zur Baugeschichte im 100 Jahre Denkmalpflege am Aachener Dom*. Aachen: Wilhelm Metz, 1955.
- Butzer 1982 = Paul L. Butzer. Mathematics in the region Aachen-Liège-Maastricht from Carolingian times to the 19th century. *Bulletin de la Société royale des sciences de Liège*, 51, 1982, pp. 5-30. ISSN: 1783-5720.
- Butzer 1995 = Paul L. Butzer. Mathematics in Egypt and its Connections with the Court School of Charlemagne. *Contemporary Mathematics*, 190, 1995, 1-1, pp. 1-30. ISSN: 0271-4132.
- Cavalieri San-Bertolo 1826-1827 = Nicola Cavalieri San-Bertolo. *Istituzioni di architettura statica e idraulica*. Bologna, 1826-1827.
- Chasles 1837 = Michel Chasles. *Aperçu historique sur l'origine et le développement des méthodes en géométrie*. Bruxelles, 1837. <https://www.persee.fr/doc/marb_0770-8203_1837_num_11_1_1033>.
- Chevalier 2019 = Pascale Chevalier. Germigny, une architecture originale?. *Bulletin du centre d'études médiévales d'Auxerre. BUCEMA*, Hors-série n. 11, 2019. ISSN: 1954-3093. DOI: 10.4000/cem.16105.
- Dézéus 1989 = Robert Dézéus. *L'art de Transcaucasie*. Vienna, 1989.
- Falkenstein 1991 = Ludwig Falkenstein. Charlemagne et Aix-la-Chapelle. *Byzantion*, 61(1), 1991, pp. 231-289. ISSN: 2294-6209.
- François 1965 = Henry François. *Irish Art in the Early Christian Period to 800 A D*. London: Methuen & Co. Ltd., 1965.
- Gilbert 1964 = Edward Gilbert. Deerhurst Priory Church and its First String Course. *Transactions of the Bristol and Gloucestershire Archaeological Society*. Vol. 83, Bristol and Gloucestershire Archaeological Society, 1964, pp. 49-69. ISSN: 0068-1032.
- Gurégian 2020 = Jean-Varoujean Gurégian. *Patrimoine historique arménien en Turquie*. L'Harmattan, 2020. ISBN: 9782343207513.
- Keuerleber 2014 = Gisela Keuerleber. Geschichte: "Aachen war das neue, zweite Rom". Deutschlandfunk Kultur, 25.01.2014. <<https://www.deutschlandfunkkultur.de/geschichte-aachen-war-das-neue-zweite-rom-100.html>>.
- Kleinbauer 1965 = W. Eugene Kleinbauer. Charlemagne's Palace Chapel at Aachen and Its Copies. *Gesta*, 4, 1965, pp. 2-11. ISSN: 0016-920X. <<https://doi.org/10.2307/1766678>>.
- Knopp 2002 = Gisbert Knopp. *Die gotische Chorhalle des Aachener Doms und ihre Ausstattung: Baugeschichte, Bauforschung, Sanierung*. Michael Imhof Verlag, 2002. ISBN: 9783935590389.
- Krautheimer 1942 = Richard Krautheimer. Introduction to an Iconography of Medieval Architecture. *Journal of the Courtauld and Warburg Institutes*, 5, 1942, pp. 1-33. ISSN: 0075-4390. <<https://archive.org/details/krautheimer-1942-iconography-med-arch/page/11/mode/2up>>.
- Kühnel 2016 = Bianca Kühnel. Jerusalem in Aachen. In *Monuments & Memory: Christian Cult Buildings and Constructions of the Past: Essays in Honour of Sible de Blaauw*. 2016, pp. 95-105. <<https://www.brepolonline.net/doi/10.1484/M.ACSHA-EB.4.2018009?mobileUi=0>>.
- Müller 2014 = Harald Müller. Aix-la-chapelle à l'époque carolingienne. Nouvelles approches. *Francia*, 41, 2014, pp. 25-48. <https://perspectivia.net/servlets/MCRFileNodeServlet/ploneimport3_derivate_00006857/2_mueller-aix-la-chapelle.pdf>.
- Olleris 1867 = Alexandre Olleris. *La vie et les oeuvres des Gerbert Pape*. Parigi: F. Thibaud, 1867.
- Pieper, Schindler 2017 = Jan Pieper, Bruno Schindler. *Thron und Altar, Oktogon und Sechzehneck. Die Herrschaftsikonographie der karolingischen Pfalzkapelle zu Aachen*. Berlin: Geymüller Verlag für Architektur, 2017. ISBN: 9783943164381.
- Polanichka 2009 = Dana Marie Polanichka. *Precious stones, living temples: Sacred space in Carolingian churches, 751-877 CE*. Los Angeles: University of California, 2009.
- Pritchard et al. 2023 = Douglas Pritchard, Marika Griffio, Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Yannick Ley. Evolution of recording methods: the Aachen Cathedral World Heritage Site documentation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1241-1249. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1241-2023, 2023>>.
- Ramírez-Weaver 2017 = Eric Ramírez-Weaver. *A Saving Science: Capturing the Heavens in Carolingian Manuscripts*. Penn State University Press, 2017. ISBN: 9780271071268.
- Siebigs 2000 = Hans-Karl Siebigs. *Die Ungarnkapelle am Dom zu Aachen. Bauliche Sanierungsmaßnahmen an der Ungarnkapelle des Domes zu Aachen in den Jahren 1991-1994* (= Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauvereins. Band 3). Aachen: Thouet, 2000.
- Yevadian 2020 = Maxime K. Yevadian. Ermittlung über die Widmungsinschrift von Dombaumeister Odo im Aachener Dom. In *Schriftenreihe Karlsverein-Dombauverein*, 55. 2020, pp. 63-73 <https://www.academia.edu/42833763/Ermittlung_%C3%BCber_die_Widmungsinschrift_von_Dombaumeister_Odo_im_Aachener_Dom>.



<https://cdn.gangemieditore.com/DOI/10.61020/11239247-202468-07.pdf>

The contribution presents the preliminary results of the semi-automatic thematization of the photogrammetric points cloud of the Aachen Cathedral using Machine Learning algorithms. The experiment identified the constituent elements across the entire structure, while the recognition of materials and construction techniques focused only on the *Westwerk* area. The identified classes were used to train the algorithm and extend semantic segmentation from small portions to entire datasets. In this way, the points cloud records the current state of the monument, providing valuable support for documentation and conservation.

Keywords: Aachen Cathedral, Machine Learning, numerical models, segmentation, classification.

The Aachen Cathedral is one of the oldest in Northern Europe and a magnificent example of medieval architecture, recognized as a UNESCO World Heritage site in 1978. The documentation project centered on this cathedral results from collaboration among Sapienza University of Rome, Robert Gordon University (Aberdeen, Scotland), Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, and the Cathedral's institution, the Dombauhütte Aachen (both based in Aachen, Germany).¹ This project aims to document the architecture of the entire complex and its constituent materials using advanced technologies, highlighting the importance of ongoing technical innovation in preserving cultural heritage. Integrated surveying campaigns [Pritchard et al. 2022] have developed the most effective approaches, methods, and tools for acquiring detailed geometric data. The models derived from survey data processing have been essential for analyzing the monument, providing an in-depth understanding through documentation and study of the geometry of structural elements [Attenni et al. 2022] and construction materials. This research falls within the latter focus, recognizing that much of the Cathedral's value is tied to its history, materials, and construction techniques, reflecting a unique combination of Carolingian, Ottonian, Gothic, and Baroque influences.

The study presents a procedure to identify the structural elements of the Cathedral and the

Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffo

Sperimentazioni di Machine Learning per la mappatura della Cattedrale di Aachen

Machine Learning experiments for mapping Aachen Cathedral

Il contributo presenta i risultati preliminari della tematizzazione semi-automatica della nuvola di punti fotogrammetrica della Cattedrale di Aachen tramite algoritmi di Machine Learning. La sperimentazione ha identificato gli elementi costitutivi sull'intera struttura, mentre il riconoscimento di materiali e tecniche costruttive si è concentrato soltanto sulla zona del Westwerk. Le classi individuate sono state utilizzate per addestrare l'algoritmo e successivamente estendere la segmentazione semantica da piccole porzioni a interi set di dati. In questo modo la nuvola di punti registra lo stato di fatto del monumento offrendo un valido supporto alla documentazione e alla conservazione.

Parole chiave: Cattedrale di Aachen, Machine Learning, modelli numerici, segmentazione, classificazione.

La Cattedrale di Aachen è una delle più antiche cattedrali del Nord Europa e un magnifico esempio di architettura medievale, riconosciuta dall'UNESCO come Patrimonio dell'Umanità nel 1978. Il progetto di documentazione che la vede come protagonista è frutto della collaborazione tra la Sapienza Università di Roma, la Robert Gordon University (Scozia), la Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule e l'istituzione della Cattedrale, la Dombauhütte Aachen (entrambe ad Aachen, Germania)¹. Il progetto mira a documentare l'architettura dell'intero complesso e i suoi materiali costitutivi utilizzando tecnologie avanzate, evidenziando l'importanza della continua innovazione tecnica nella conser-

vazione del patrimonio culturale. Le campagne di rilevamento integrato [Pritchard et al. 2022] hanno previsto lo sviluppo degli approcci, dei metodi e degli strumenti più efficaci per acquisire dati geometrici dettagliati. I modelli derivanti dall'elaborazione dei dati di rilievo, invece, sono stati necessari per analizzare il monumento, fornendone una comprensione approfondita attraverso la documentazione e lo studio della geometria degli elementi strutturali [Attenni et al. 2022] e dei materiali costruttivi. La ricerca presentata si inserisce all'interno di questo secondo filone, riconoscendo come molto del valore della Cattedrale sia legato alla sua storia, ai materiali e alle tecniche costruttive, che riflettono una combinazione unica



1/ *Pagina precedente*. Planimetria della Cattedrale con indicazione dei diversi ambienti e delle fasi di costruzione sulla base degli elaborati del rilievo del 2022-2023 (restituzione della pianta a cura di Francesca Picchio). Previous page. *Floor plan of the Cathedral showing the different environments and construction phases based on the 2022-2023 survey drawings (floor plan created by Francesca Picchio).*

2/ A sinistra il Westwerk, al centro la Cappella di san Nicola e Michele, a destra la Cappella ungherese (foto di Roberto Barni). On the left, the Westwerk; in the center, the chapel of Saint Nicholas and Saint Michael; on the right, the Hungarian Chapel (photo by Roberto Barni).

di influenze carolingie, ottoniane, gotiche e barocche.

Lo studio presenta una procedura per individuare gli elementi costitutivi della Cattedrale e le diverse tipologie di materiali e tecniche costruttive tramite algoritmi di *Machine Learning* sviluppati sui modelli numerici prodotti². Tali processi, grazie alla capacità di elaborare e interpretare grandi quantità di dati tridimensionali in modo efficiente e accurato, consentono di riconoscere gli oggetti classificandoli in base alle loro caratteristiche geometriche e radiometriche. Ciò offre un valido supporto sia alla documentazione, identificando gli elementi costitutivi della Cattedrale e i materiali e le tecniche costruttive nella zona del *Westwerk*, sia alla sua conservazione, migliorando la qualità e la precisione delle analisi svolte su di essi [De Luca 2023].

Fasi storiche e processi costruttivi

La struttura della Cattedrale esprime le diverse fasi e i processi costruttivi che hanno portato alla configurazione attuale (fig. 1). L'impianto ottagonale della Cappella Palatina è ancora ben riconoscibile e costituisce il nucleo dell'edificio. La sua costruzione, iniziata nel 756 per volere di Carlo Magno, rappresenta uno dei primi esempi di architettura carolingia con influenze romane e bizantine, riscontrabili nelle tipologie di colonne, nei rivestimenti marmorei, negli apparati decorativi e nei mosaici che, seppur risalenti al XIX secolo ripropongono le soluzioni figurative originarie. La Cappella Palatina fu integrata in una struttura più grande che includeva un coro e una navata (IX-XII secolo) [Bonelli, Bozzoni, Franchetti Pardo 2009, pp. 19-21, p. 69; Pieper, Schindler 2017, pp. 31-47]. Lo spazio liturgico della Cattedrale fu ulteriormente ampliato durante il periodo gotico tra il 1355 e il 1414, con il coro, costruito in asse con l'ingresso principale e caratterizzato da alte vetrate policrome, archi a sesto acuto e contrafforti esterni per sostenere le pareti. Del periodo gotico sono anche le cappelle laterali [Maintz 2007], eccezion fatta per la Cappella ungherese che venne realizzata durante il periodo barocco (XVII-XVIII secolo) insieme al portale del



Westwerk (fig. 2) e al rifacimento della cupola della Cappella Palatina [Siebigs 2000]. Da questo periodo in poi, l'assetto della Cattedrale è rimasto invariato; gli unici lavori, particolarmente intensi dopo la Seconda Guerra Mondiale, hanno riguardato interventi di restauro per preservare la struttura e le decorazioni quando la cattedrale subì danni a causa dei bombardamenti, mantenendone l'integrità architettonica e artistica [Schein, Wentzler 2008]. Attualmente la struttura continua a essere oggetto di manutenzione e restauri e l'uso di tecnologie avanzate per la documentazione permette di monitorare e gestire i danni causati dal tempo e dagli agenti atmosferici.

Scomposizione per elementi costitutivi e redazione di abachi

Lo studio delle diverse fasi costruttive della Cattedrale consente di comprendere l'influenza di differenti culture e periodi storici che ha inevitabile guidato la scelta dei materiali da costruzione e delle tecniche di realizzazione. L'analisi di tali aspetti rientra a pieno

different types of materials and construction techniques through Machine Learning algorithms developed on the generated digital models.² Thanks to the ability to efficiently and accurately process and interpret large volumes of three-dimensional data, these processes enable the recognition of objects by classifying them according to their geometric and radiometric characteristics. This provides valuable support for documentation, identifying the Cathedral's constituent elements and the construction materials and techniques in the Westwerk area, and for its conservation, improving the quality and accuracy of analyses conducted on them [De Luca 2023].

Historical phases and construction processes

The structure of the Cathedral reflects the different phases and construction processes that have led to its current configuration (fig. 1). The octagonal layout of the Palatine Chapel is still clearly recognizable and forms the core of the building. Its construction, initiated in

3/ Lettura e scomposizione dell'architettura
(elaborazione di Martina Attenni).
Reading and decomposition of the architecture
(processing by Martina Attenni).

756 at the behest of Charlemagne, represents one of the earliest examples of Carolingian architecture, with Roman and Byzantine influences visible in the various types of stone used for the perimeter walls, columns, and marbles, as well as in the decorations and mosaics. The Palatine Chapel was later incorporated into a larger structure that included a choir and nave (9th-12th centuries) [Bonelli, Bozzoni, Franchetti Pardo 2009, pp. 19-21, p. 69; Pieper, Schindler 2017, pp. 31-47]. The Cathedral's liturgical space was further expanded during the Gothic period between 1355 and 1414, with the construction of the Choir aligned with the main entrance. Stained glass windows characterize this addition, with pointed arches and external buttresses supporting the walls. The lateral chapels also date to the Gothic period [Maintz 2007], except the Hungarian Chapel, which was built during the Baroque period (17th-18th centuries), along with the Westwerk portal (fig. 2) and the reconstruction of the Palatine Chapel's dome [Siebigs 2000]. From this period onward, the Cathedral's layout has remained unchanged; the only work, particularly intensive after World War II, involved restoration efforts to preserve the structure and decorations when the Cathedral sustained damage from bombings, thereby maintaining its architectural and artistic integrity [Schein, Wentzler 2008]. Today, the structure continues to undergo maintenance and restoration, and advanced documentation technologies enable monitoring and managing damage caused by time and the elements.

Decomposition by structural elements and compilation of catalogs

Studying the Cathedral's various construction phases enables understanding the influence of different cultures and historical periods, which inevitably guided the choice of construction materials and building techniques. The analysis of these aspects fully aligns with an architectural interpretation that proceeds from the general to the particular, where reference to the Vitruvian *firmitas* and *venustas* guides the decomposition of the object³ (fig. 3). The complex structure was built entirely of stone, reflecting both the local resources

titolo in una lettura dell'architettura che procede dal generale al particolare in cui il riferimento alla *firmitas* e alla *venustas* vitruviane guida la scomposizione dell'oggetto³ (fig. 3). La struttura del complesso è stata costruita interamente in pietra, riflettendo sia le risorse locali disponibili sia l'influenza delle tecniche e dei materiali importati da altre regioni. Le murature mostrano l'utilizzo di diverse tipologie di elementi lapidei, le cui tecniche di lavorazione prevedono essenzialmente la tagliatura, la sagomatura e la posa in opera. Alcune parti risultano più compatte e caratterizzate dalla presenza di feritoie, altre maggiormente vuote grazie alla presenza di aperture dalle geometrie differenti, vetrate, logge e balconi. Dal punto di vista dell'estetica, invece, l'edificio si integra perfettamente con il contesto circostante, dominando la piazza da un lato con il campanile, dall'altro con il Coro gotico. Gli elementi scolpiti, come gli ordini architettonici, la trabeazione che corre intorno al Westwerk e alla Cappella ungherese, e le sculture gotiche mostrano un'altissima qualità, venivano spesso lavorate in loco e poi montate con grande cura. Le coperture dei

vari ambienti presentano geometrie differenti alternando particolari soluzioni per le cupole a tetti a falde.

Questo processo di scomposizione ha riguardato le superfici esterne dell'intero complesso, mentre la catalogazione di materiali e tecniche costruttive è stata sviluppata soltanto sulla zona del *Westwerk*. Essi sono stati classificati all'interno di un abaco che individua i materiali e le tecniche costruttive, la loro collocazione all'interno del complesso e una sintetica descrizione (tabella 1, figg. 4, 5).

Tra i materiali da costruzione si rileva un preponderante utilizzo di blocchi di *blaustein*, una pietra di colore tendente al blu estratta molto vicino ad Aachen, usata originariamente sia per le murature esterne sia per gli elementi scultorei, ma anche più recentemente per rinforzare le parti più antiche danneggiate. Essa si trova spesso accostata a blocchi di pietra calcarea in diverse tonalità di marrone risalenti a epoca carolingia o romanica, o calcare grigio. Blocchi e lastre di grandi e medie dimensioni si alternano a piccoli blocchetti di pietra calcarea e grovaccia sia nella zona del *Westwerk* sia nella Cappella Palatina. Essa,

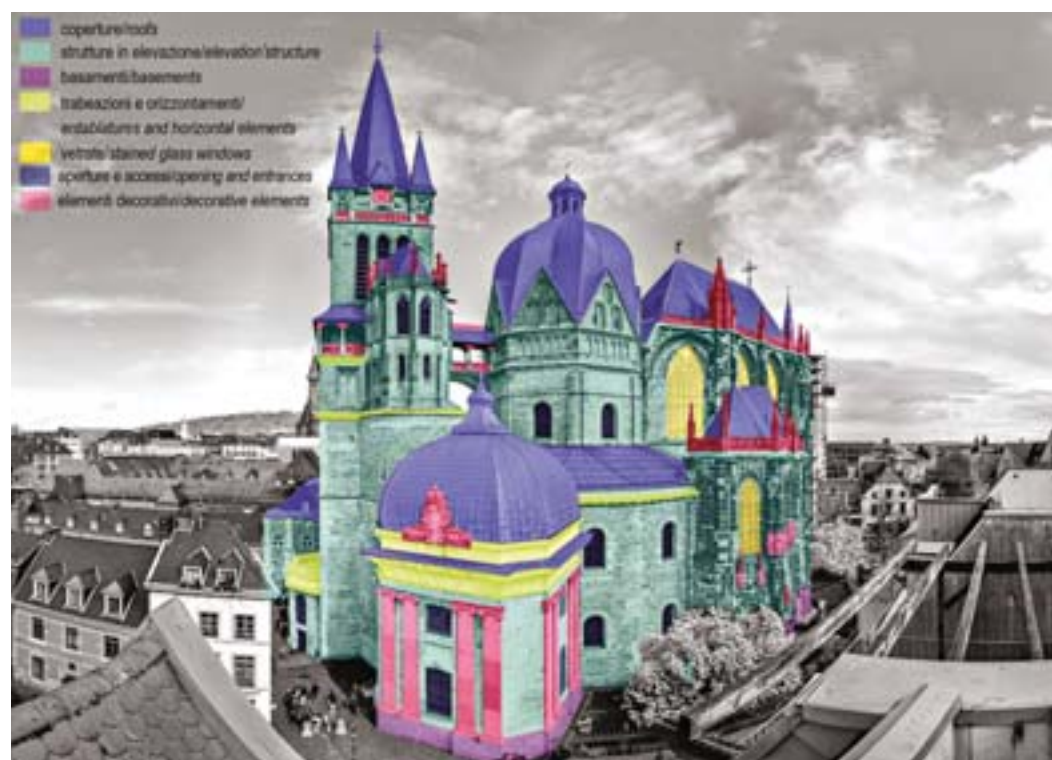


Tabella 1/ Abaco dei materiali e delle tecniche costruttive utilizzate nella zona del Westwerk (elaborazione di Martina Attenni).

Table 1/ Material and construction technique chart used in the Westwerk area (compiled by Martina Attenni).

Cod./Cod.	Collocazione/Position	Materiale/Material	Tecnica costruttiva/Construction technique	Descrizione/Description
01	Zona absidata della facciata di ingresso/ <i>Apse area of the entrance façade</i>	Pietra calcarea/Limestone	Blocchetti con tessitura omogenea con giunti di spessore di 4 cm/ <i>Small blocks with homogeneous texture, joints 4 cm thick</i>	Tessitura omogenea dei ricorsi, lunghezza da 20 a 40 cm, altezza 10 cm/ <i>Homogeneous course texture, length from 20 to 40 cm, height 10 cm</i>
02	Cantionali/ <i>Cornerstones</i>	blaustein e pietra calcarea/ <i>Blaustein and limestone</i>	Blocchi squadrati e pietra irregolare con giunti di spessore > 2cm/ <i>Squared blocks and irregular stone with joints > 2 cm thick</i>	Blocchi di blaustein di lunghezza da 30 a 72 cm e altezza da 30 a 40 cm; blocchi in pietra calcarea antica in diverse tonalità di marrone dell'epoca carolingia o romanica di lunghezza da 35 a 50 cm e altezza da 20 a 40 cm/ <i>Blaustein blocks: length from 30 to 72 cm, height from 30 to 40 cm; Ancient limestone blocks in various shades of brown from the Carolingian or Romanesque period: length from 35 to 50 cm, height from 20 to 40 cm</i>
03	Feritoie/ <i>Arrowslits</i>	Blaustein e pietra calcarea/ <i>Blaustein and limestone</i>	Blocchi squadrati tagliati con precisione, superfici levigate e giunti sottili riempiti di malta/ <i>Precisely cut squared blocks, smooth surfaces, and thin joints filled with mortar</i>	Blocchi di blaustein di lunghezza da 15 a 45 cm e altezza da 10 a 35 cm; pietra calcarea in diverse tonalità di marrone di lunghezza da 15 a 35 cm e altezza da 15 a 35 cm. I blocchi di blaustein sono stati inseriti successivamente nella pietra carolingia per le loro caratteristiche di resistenza/ <i>Blaustein blocks: length from 15 to 45 cm, height from 10 to 35 cm; Limestone blocks in various shades of brown: length from 15 to 35 cm, height from 15 to 35 cm. Blaustein blocks were later inserted into the Carolingian stone for their durability</i>
04	Facciata di ingresso, area al di sopra dell'arco/ <i>Entrance façade, area above the arch</i>	Grovacca/ <i>Greywacke</i>	Blocchetti con tessitura omogenea con giunti di spessore di 4 cm/ <i>Small blocks with homogeneous texture, joints 4 cm thick</i>	Tessitura omogenea dei ricorsi, lunghezza da 20 a 45 cm e altezza da 4 a 10 cm/ <i>Homogeneous course texture, length from 20 to 45 cm, height from 4 to 10 cm</i>
05	Facciata di ingresso, secondo livello/ <i>Entrance façade, second level</i>	Calcere grigio di Heinsberg/ <i>Heinsberg grey limestone</i>	Blocchi squadrati tagliati con precisione, superfici levigate e giunti sottili riempiti di malta/ <i>Precisely cut squared blocks, smooth surfaces, and thin joints filled with mortar</i>	Lunghezza da 60 a 80 cm e altezza 45 cm. Gli inserti chiari furono usati come aggiunta successiva per stabilizzare la struttura/ <i>Length from 60 to 80 cm, height 45 cm. Light-colored inserts were added later to stabilize the structure</i>
06	Loggia/ <i>Loggia</i>	Blaustein/ <i>Blaustein</i>	Blocchi scolpiti e intagliati/ <i>Curved and sculpted blocks</i>	Vierpass (quadrilobo) prefabbricato nella Dombauhütte di epoca gotica/ <i>Vierpass (quatrefoil) prefabricated in the Gothic-era Dombauhütte</i>
07	Trabeazione della superficie ottagonale e delle cornici delle finestre/	Blaustein/ <i>Blaustein</i>	Blocchi scolpiti e intagliati/ <i>Curved and sculpted blocks</i>	Blocchi di dimensioni omogenee posati in opera a corsi alternati/ <i>Homogeneous-sized blocks laid in alternating courses</i>
08	Pareti perimetrali/	Blaustein/ <i>Blaustein</i>	Lastre lapidee/ <i>Stone slabs</i>	Dimensioni omogenee, lunghezza da 73 a 78 cm, altezza 30 cm/ <i>Homogeneous dimensions, length from 73 to 78 cm, height 30 cm</i>
09	Basamento/	Blaustein/ <i>Blaustein</i>	Blocchi squadrati tagliati con precisione, superfici levigate e giunti sottili riempiti di malta/ <i>Precisely cut squared blocks, smooth surfaces, and thin joints filled with mortar</i>	Lunghezza da 60 a 100 cm, altezza 60 cm/ <i>Length from 60 to 100 cm, height 60 cm</i>

più che in ogni altra parte, è caratterizzata dall'alternarsi di materiali eterogenei provenienti da zone limitrofe: il tufo di Webeirner, pietre calcaree provenienti dalla Lorena, da Euville e da Jaumont, trachite Drachenfelser e arenaria di Herzogenrath [Maintz 2009, p. 81; Heckner, Beckmann 2012, p. 100].

La tecnica costruttiva prevalentemente usata è quella della muratura in pietra. In alcuni casi i blocchetti sono posati in opera con una tessitura omogenea (fig. 4: 01, 04) e tenuti insieme da giunti di malta spessi circa 4 cm; in altri vengono utilizzati blocchi squadrati tagliati con precisione, con superfici levigate e giunti sottili (fig. 4: 03, 05), o murature miste nelle quali si alternano blocchi squadrati a pietre irregolari con giunti di spessore superiore a 2 cm (fig. 4: 02). Per i fusti delle paraste vengono utilizzate lastre lapidee quadrate (fig. 4: 08) e blocchi scolpiti e intagliati nel caso di elementi scultorei e decorativi (fig. 4: 06, 07, 09).

I processi di scomposizione dell'architettura e il riconoscimento di materiali e tecniche costruttive sono stati propedeutici per un uso consapevole dei dati di rilievo e per le successive operazioni di tematizzazione condotte su di essi tramite algoritmi di *Machine Learning*.

Il rilievo della Cattedrale e la preparazione dei dati

L'intero processo sperimentale di classificazione mediante algoritmi di *Machine Learning* si appoggia su una base dati costituita da una nuvola di punti tridimensionale dell'intero monumento. Le tre campagne di acquisizione dei dati, realizzate tra ottobre 2022 e dicembre 2023, hanno contribuito a costruire un apparato documentale esteso grazie all'integrazione di tecnologie TLS (*Terrestrial Laser Scanning*), mediante l'utilizzo combinato di laser scanner 3D statici e mobili⁴, con processi fotogrammetrici.

available and the influence of techniques and materials imported from other regions. The masonry reveals different stone elements, with working techniques that primarily include cutting, shaping, and installation. Some parts appear more compact and are characterized by loopholes, while others are more open due to apertures with various geometries, windows, loggias, and balconies.

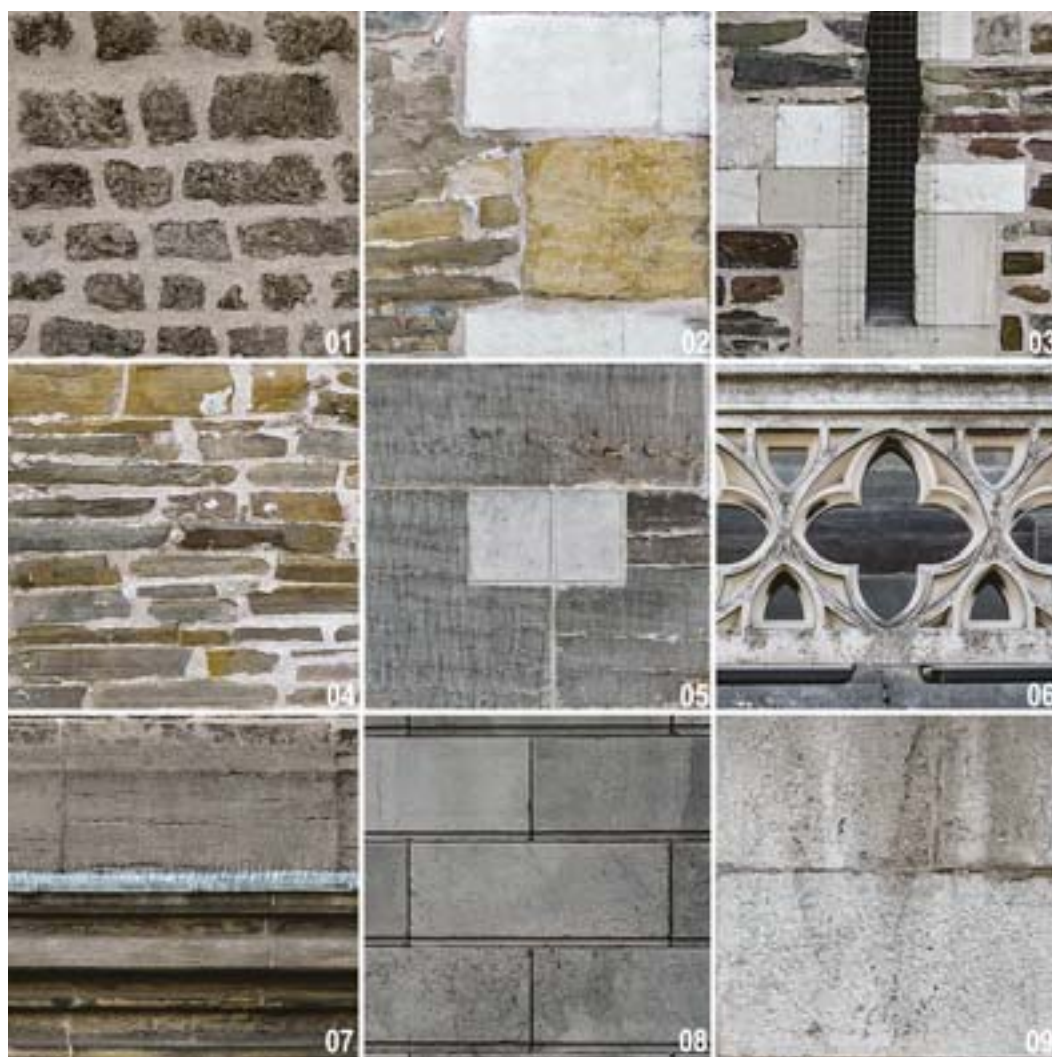
Aesthetically, the building integrates seamlessly with the surrounding context, dominating the square with its bell tower on one side and the Gothic Choir on the other. The sculpted elements, such as architectural orders, the entablature surrounding the Westwerk and the Hungarian Chapel, and Gothic sculptures, demonstrate high craftsmanship and were often worked on-site before being carefully assembled. The coverings of the various spaces feature different geometries, alternating unique solutions for domes and pitched roofs.

4/ Abaco fotografico dei materiali e delle tecniche costruttive murarie della zona del Westwerk descritte nella tabella 1 (elaborazione di Martina Attenni).
Photographic catalog of materials and masonry construction techniques in the Westwerk are described in Table 1 (processing by Martina Attenni).

This decomposition process focused on the exterior surfaces of the entire complex, while the cataloging of materials and construction techniques was developed only for the Westwerk area. These were classified within a catalog identifying the materials and construction techniques, their location within the complex, and a brief description (table 1, figs. 4, 5). Among the building materials, Blaustein blocks are predominantly used, a bluish stone quarried very close to Aachen, initially used for exterior masonry and sculptural elements, and more recently to reinforce the oldest damaged parts. It is often paired with blocks of limestone in various shades of brown, dating back to the Carolingian or Romanesque periods or gray limestone. Large and medium-sized blocks and slabs alternate with small limestone and sandstone blocks in the Westwerk and Palatine Chapel areas. The latter, more than any other area, is characterized by a variety of heterogeneous materials sourced from nearby regions: Weiberner tuff, limestone from Lorraine, Euville, and Jaumont, Drachenfels trachyte, and Herzogenrath sandstone [Maintz 2009, p. 81; Heckner, Beckmann 2012, p. 100]. The predominant construction technique is stone masonry. In some cases, the stones are arranged with a uniform texture (fig. 4: 01, 04) and bound with mortar joints approximately 4 cm thick; in others, precisely cut squared blocks with smooth surfaces and thin joints are used (fig. 4: 03, 05), or mixed masonry where squared blocks alternate with irregular stones with joints over 2 cm thick (fig. 4: 02). For the shafts of pilasters, squared stone slabs are used (fig. 4: 08), and carved blocks are employed for sculptural and decorative elements (fig. 4: 06, 07, 09). The decomposition of the architecture and the identification of materials and construction techniques were preliminary steps for the informed use of survey data and the subsequent thematization operations conducted on them using Machine Learning algorithms.

Surveying the Cathedral and data preparation

The entire experimental classification process using Machine Learning algorithms relies on a database composed of a three-dimensional



In un'ottica di valutazione e controllo dei dati, i laser scanner 3D statici sono stati impiegati per la copertura integrale di tutte le aree accessibili, sia interne che esterne; lo scanner mobile è stato adoperato per documentare le due scale a chiocciola del Westwerk e gli ambienti del sottotetto; la fotografia da terra, per elaborazioni fotogrammetriche, ha interessato prevalentemente la sala ottagonale, mentre quella da SAPR (Sistemi Aeromobili a Pilo-taggio Remoto) si è estesa a tutte le superfici esterne.

Le diverse campagne di acquisizione, condotte a distanza di mesi, sono state necessarie per compensare le zone d'ombra causate dalla presenza di opere provvisorie legate

agli interventi di conservazione. Le nuvole di punti derivate dalle varie metodologie di rilievo e dalle molteplici tecnologie di rilevamento sono state tra loro combinate grazie al riconoscimento di punti notevoli omologhi utilizzando come riferimento metrico le coordinate appartenenti alle nuvole di punti acquisite mediante laser scanner 3D. In particolare, la nuvola di punti dell'esterno acquisita mediante SAPR è stata allineata a quella scanner 3D sulla base di 23 punti notevoli distribuiti uniformemente su tutte le superfici con un errore medio di allineamento su punti corrispondenti di 9 mm (fig. 6).

Le due nuvole di punti sono state successivamente filtrate separatamente utilizzando in

5/ Abaco fotografico dei materiali presenti sulle superfici esterne della Cattedrale non appartenenti alla categoria dei materiali da costruzione (elaborazione di Martina Attenni). Da sinistra a destra: lastre chiodate in piombo per il rivestimento della copertura, infisso in metallo, le due porte di ingresso in legno e bronzo, le inferriate e i sistemi di oscuramento.

Photographic catalog of materials on the exterior surfaces of the Cathedral that do not belong to the construction material category (processing by Martina Attenni). From left to right:

lead-clad slates for the roof covering, metal frame, two wooden and bronze entrance doors, wrought iron grilles, and shading systems.

maniera combinata lo strumento di *Statistical Outlier Removal* (SOR), e quello di riduzione del rumore (*noise filter*). Per la nuvola di punti fotogrammetrica, notevolmente più rada, si è scelto di impiegare valori di filtraggio piuttosto deboli al fine di preservare i dettagli morfologici ed evitare un decadimento eccessivo delle informazioni soprattutto in regioni costituite da elementi a ridotto spessore. Per la nuvola strutturata, invece, il filtraggio è stato più consistente per rimuovere gli *outliers* generati soprattutto in corrispondenza delle coperture dall'elevata riflettività delle superfici a causa di un sottile strato di acqua piovana depositato durante le acquisizioni. Successivamente al filtraggio, le nuvole di punti sono state sottocampionate con un passo di 1 cm per supportare in maniera più efficiente le fasi di analisi e confronto dati e per rendere sostenibile l'impiego di algoritmi di *Machine Learning* dal punto di vista computazionale (tabella 2).

Per la sperimentazione condotta, che riguarda le superfici esterne del monumento, si è scelto di impiegare la nuvola di punti realizzata mediante procedure di *Structure from Motion* e *Image Matching* (SfM/IM). Tale nuvola di punti è stata elaborata a partire da circa 3.000

scatti⁵ necessari a coprire l'intero involucro. Rispetto alla nuvola di punti generata a partire dai laser scanner 3D, quella fotogrammetrica prodotta risulta notevolmente omogenea sia in termini di densità dei punti (fig. 7) che di caratterizzazione radiometrica (fig. 8).

Tale constatazione, come facilmente intuibile, è legata all'accessibilità limitata, se comparata a quella di uno strumento SAPR, di punti di presa delle coperture. Questa iniziale omogeneità dei dati permette di ottimizzare la fase di preparazione della nuvola, essenziale per progettare correttamente la classificazione assistita. Nonostante queste considerazioni, il dato di riflettanza associato a ciascuno dei punti acquisiti con tecnologia TLS è in grado di arricchire notevolmente la descrizione delle caratteristiche delle superfici fornendo indicazioni utili ai fini della distinzione e classificazione dei materiali. Sebbene infatti in assenza di un processo di calibrazione per la generalizzazione del dato non sia possibile associare in maniera univoca i materiali a determinati valori di riflettanza [Viswanath, Jiang, Saripalli 2024], la loro variazione in termini relativi può comunque contribuire positivamente alla fase di addestramento del processo di *Machine Learning* (fig. 9).

points cloud of the monument. The three data acquisition campaigns, conducted between October 2022 and December 2023, helped build an extensive documentary apparatus by integrating TLS (Terrestrial Laser Scanning) technologies, utilizing a combination of static and mobile 3D laser scanners⁴ and photogrammetric processes.

For data evaluation and control, static 3D laser scanners were used for complete coverage of all accessible areas, both interior and exterior; a mobile scanner documented the two spiral staircases of the Westwerk and the attic spaces; ground-based photography for photogrammetric processing mainly covered the octagonal hall, while that from UAVs (SAPR) covered all external surfaces.

The various acquisition campaigns, conducted months apart, were necessary to compensate for shadowed areas caused by temporary structures related to conservation work. Points clouds derived from various survey methodologies and multiple technologies were combined using homologous significant points, referencing the metric coordinates from point clouds obtained with 3D laser scanners. The points cloud of the exterior acquired by the UAV was precisely aligned with the 3D scanner cloud based on 23 significant points distributed uniformly across all surfaces, with an average alignment error of 9 mm on corresponding points (fig. 6). The two-point clouds were then separately filtered using the Statistical Outlier Removal (SOR) tool and a noise reduction filter. For the photogrammetric point cloud, significantly sparser, weaker filtering values were used to preserve morphological details and avoid excessive data degradation, especially in regions with thin elements. For the structured cloud, however, filtering was more robust in removing outliers, especially on surfaces with high reflectivity due to a thin layer of rainwater during acquisition. After filtering, the point clouds were downsampled with a step of 1 cm to support data analysis efficiently and comparison phases and make Machine Learning algorithms computationally feasible (table 2).

For the experiment that was conducted, which focused on the monument's exterior surfaces, the selected points cloud was generated through



6/ Confronto tra i dati di rilievo. a. nuvola di punti TLS; b. nuvola di punti derivata da processi fotogrammetrici; c. calcolo della cloud to cloud distance (elaborazione di Marika Griffò).

Comparison of survey data: a. TLS points cloud; b. points cloud derived from photogrammetric processes; c. calculation of the cloud-to-cloud distance (processing by Marika Griffò).

Structure from Motion and Image Matching (SfM/IM) procedures. This points cloud was processed from approximately 3,000 shots⁵ needed to cover the entire structure. Compared to the 3D laser scanner-derived point cloud, the photogrammetric points cloud proved significantly more homogeneous regarding point density (fig. 7) and radiometric characterization (fig. 8).

This initial data homogeneity, as intuitively expected, is due to limited accessibility compared to UAV tools for roof captures. This consistency enables optimization of the cloud preparation phase, which is essential

A questo scopo, il valore di riflettanza è stato proiettato dalla nuvola di punti TLS a quella fotogrammetrica.

L'ultima fase di preparazione del dato riguarda l'individuazione di dataset omogenei e la relativa segmentazione della nuvola di punti. A tal fine, l'analisi delle tecniche costruttive precedentemente presentata ha permesso di identificare sette zone pressoché uniformi su cui poter condurre le fasi di *training* e predizione del dato per la classificazione. Le zone omogenee individuate possono essere così descritte (fig. 10):

- il *Westwerk*, che comprende la facciata monumentale, la cella campanaria, le torri laterali e la loggia del piano superiore, costituito prevalentemente da opera quadrata in pietra calcarea e da muratura a conci sbozzati;
- la Cappella Palatina, costituita anch'essa da opera quadrata e da muratura a conci sbozzati;
- il Coro, costituito dalle imponenti vetrate scandite da telai lapidei in blocchi scolpiti, dai pilastri in blocchi squadrati e dal ricco apparato scultoreo;
- la Cappella dei santi Carlo e Uberto, costituita dagli stessi elementi architettonici del Coro gotico;
- la Cappella dei santi Nicola e Michele, con vetrate e pilastri in blocchi squadrati;

rali e la loggia del piano superiore, costituito prevalentemente da opera quadrata in pietra calcarea e da muratura a conci sbozzati;

- la Cappella Palatina, costituita anch'essa da opera quadrata e da muratura a conci sbozzati;
- il Coro, costituito dalle imponenti vetrate scandite da telai lapidei in blocchi scolpiti, dai pilastri in blocchi squadrati e dal ricco apparato scultoreo;
- la Cappella dei santi Carlo e Uberto, costituita dagli stessi elementi architettonici del Coro gotico;
- la Cappella dei santi Nicola e Michele, con vetrate e pilastri in blocchi squadrati;

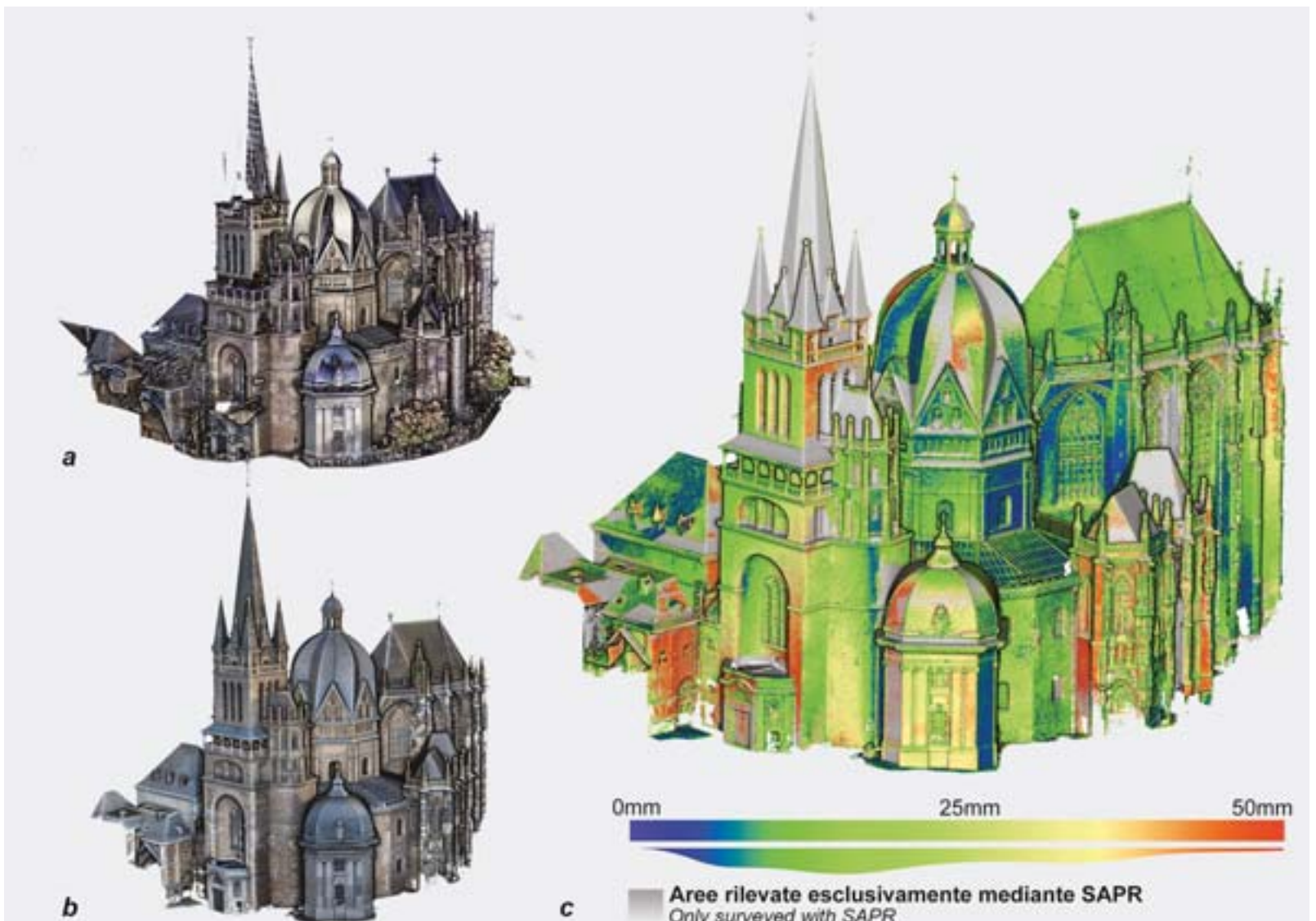


Tabella 2/ Sintesi dei dati nelle diverse fasi di elaborazione riguardanti le nuvole di punti di tutte le superfici esterne della Cattedrale (elaborazione di Marika Griffò).

Table 2/ Summary of data from different processing phases concerning the point clouds of all external surfaces of the Cathedral (compiled by Marika Griffò).

Arece di interesse <i>Investigated area</i>	Strumento di acquisizione <i>Capturing device</i>	Numero di acquisizioni <i>Number of capturings</i>	Numero di punti complessivo <i>Total number of points</i>	Densità media (N punti/cm ²) <i>Medium density (points N/sq cm)</i>	Numero di punti complessivo dopo riperimetrazione e filtraggio <i>Total points number after boundary delimitation and filtering</i>	Numero di punti complessivo dopo decimazione a 1cm <i>Total points number after 1cm decimation (mln)</i>
Esterni <i>Exteriors</i>	Z+F imager 5010 e Z+F imager 5016	105 scansioni	+/- 2.000	+/- 6	467	80,6
	Mavic Air2 DJI	+/- 3000 foto	116,5	+/- 1	103	65

- le Cappelle di sant'Anna e di san Mattia, anch'esse costituite dalle ampie vetrate e da pilastri;

- la Cappella ungherese, con paraste ioniche binate, costituita da blocchi squadrati di pietra calcarea e lastre di rivestimento realizzate con lo stesso materiale.

Sperimentazione di Machine Learning e analisi dei risultati

La classificazione basata sulla segmentazione⁶ semantica è stata essenziale per facilitare l'interpretazione e la diffusione dei dati di rilievo caratterizzando le informazioni digitali rispetto all'identificazione delle componenti architettoniche di un edificio o in termini di mappatura di materiali, tecniche costruttive, o fenomeni di degrado [Weinmann 2016]. Una prima applicazione della segmentazione semantica ha riguardato la classificazione *geometry based*, in cui l'informazione di input è rappresentata dalla nuvola di punti, poiché la classificazione è guidata principalmente dal riconoscimento delle proprietà geometriche del modello digitale e dall'identificazione degli elementi architettonici rilevanti.

Per produrre un dataset adeguato all'iter di classificazione tramite *Machine Learning* il processo di elaborazione ha richiesto sia la riduzione del rumore nella nuvola di punti, sia la diminuzione della dimensione dei dati. Il primo è inteso come la deviazione irregolare dei punti dagli oggetti rilevati e può derivare da caratteristiche strumentali o interferenze (eccessiva deviazione del raggio laser dalla superficie, vibrazioni strumentali), fattori di

posizionamento (eccessiva prossimità dell'oggetto rilevato) e fattori ambientali (interferenze dovute alla presenza di ostacoli o elementi con elevata riflettività, condizioni di luce e umidità non ottimali) [Macher et al. 2017]. La seconda operazione, invece, prevede una fase di campionamento (decimazione) per consentire una gestione più semplice delle informazioni digitali 3D e accelerare ulteriormente le fasi di elaborazione e visualizzazione, a discapito di una perdita di risoluzione e dettaglio. Anche il tipo di formato è cruciale, così come la scelta di suddividere i dati in porzioni di dimensioni più piccole.

Per i diversi dataset riconosciuti all'interno dell'oggetto di studio, l'approccio di segmentazione semantica basato sull'algoritmo Random Forest⁷ [Grilli 2019; Chehata, Guo, Mallet 2009] è stato applicato caso per caso: per ogni porzione di dataset sono state riconosciute e annotate manualmente diverse classi, successivamente sono stati estratti degli insiemi di caratteristiche, le *features*, adeguate e selezionate in relazione alla geometria e alla morfologia della nuvola di punti⁸ (fig. 11).

Ogni porzione del dataset è un raggruppamento dei dati in più regioni omogenee con proprietà simili. Queste regioni sono omogenee rispetto alle *features*, che costituiscono una proprietà caratteristica o un insieme di proprietà uniche, misurabili e differenziabili. Nel caso delle nuvole di punti, le *features* sono tipicamente collegate a caratteristiche geometriche specifiche della distribuzione locale nell'intorno dei punti, come la normale della superficie, i gradienti, la curvatura.

for correctly designing assisted classification. Despite these considerations, the reflectance data associated with each TLS-acquired point significantly enhances the surface description, providing valuable indications for distinguishing and classifying materials. Indeed, even without a calibration process for generalizing the data, it is not possible to associate materials uniquely with specific reflectance values [Viswanath, Jiang, Saripalli 2024]; their relative variation can nonetheless positively contribute to the Machine Learning training phase (fig. 9).

To this end, the reflectance value was projected from the TLS points cloud onto the photogrammetric one.

The final data preparation phase involves identifying homogeneous datasets and segmenting the points cloud accordingly. To this end, the previously discussed analysis of construction techniques enabled the identification of seven nearly uniform zones to conduct data training and prediction phases for classification. These homogeneous zones are described as follows (fig. 10):

- Westwerk: including the monumental façade, bell chamber, side towers, and upper loggia, primarily comprising squared limestone masonry and rough stone masonry;

- Palatine Chapel: also comprising squared masonry and rough stone masonry;

- Choir: featuring large stained-glass windows framed by sculpted stone blocks, squared-block pillars, and a rich sculptural display;

- Chapel of Saints Charles and Hubert: with the same architectural elements as the Gothic Choir;

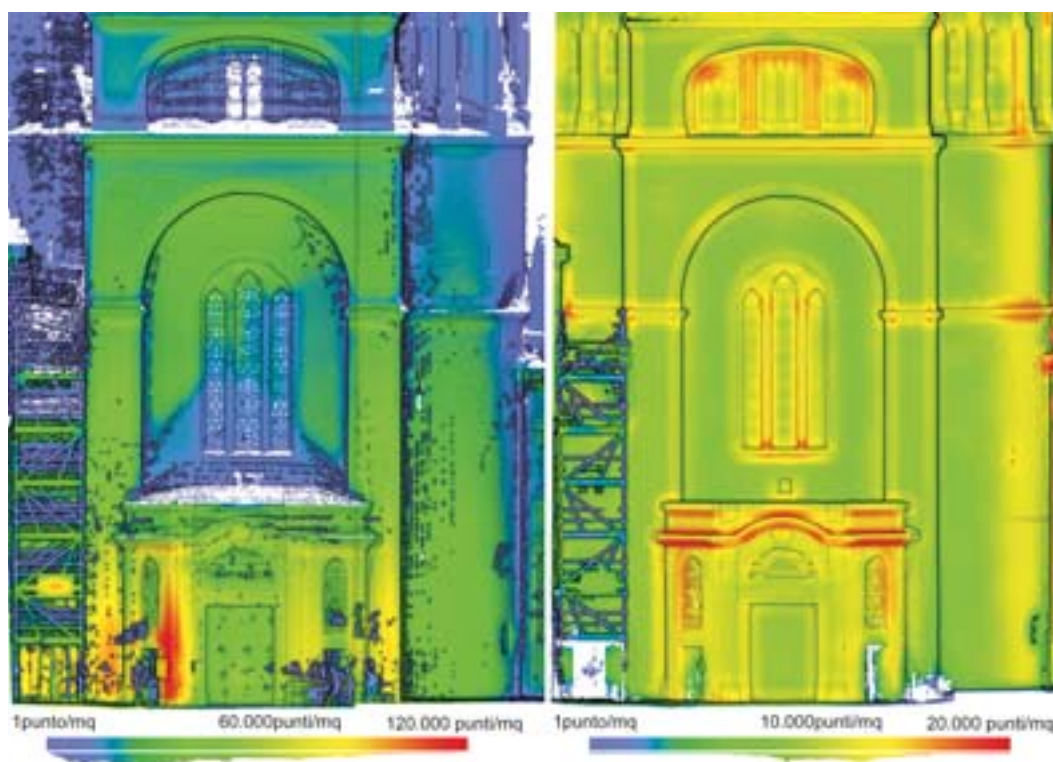
- Chapel of Saints Nicholas and Michael: with stained-glass windows and squared-block pillars;

- Chapels of Saint Anne and Saint Matthias: also characterized by large stained-glass windows and pillars;

- Hungarian Chapel: featuring paired Ionic pilasters constructed of squared limestone blocks with cladding slabs made of the same material.

This segmentation by homogeneous areas supports the classification and predictive processes facilitated by Machine Learning algorithms.

7/ Confronto tra le caratteristiche radiometriche della nuvola di punti da laser scanner, a sinistra, e fotogrammetrica, a destra (elaborazione di Marika Griffò).
Comparison of radiometric characteristics of the TLS points cloud on the left and the photogrammetric points cloud on the right (processing by Marika Griffò).



Machine Learning experimentation and results analysis

Semantic segmentation-based classification⁶ was essential for facilitating the interpretation and dissemination of survey data, characterizing digital information concerning the identification of architectural components of a building, and mapping materials, construction techniques, or signs of deterioration [Weinmann 2016].

The first application of semantic segmentation involved geometry-based classification, where the points cloud represents the input information. Here, classification is primarily guided by recognizing the geometric properties of the digital model and identifying relevant architectural elements.

To create a suitable dataset for Machine Learning classification, data processing required noise reduction in the points cloud and data size reduction. The noise here refers to the irregular deviation of points from the surveyed objects, which can stem from instrumental characteristics or interferences (such as excessive laser deviation from the

Una prima applicazione del processo di etichettatura manuale della Cattedrale di Aachen ha riguardato l'individuazione di classi relative agli elementi compositivi: coperture, strutture in elevazione, trabeazione e orizzontamenti, parapetti, aperture e accessi, vetrate, elementi decorativi, altro⁹.

Indipendentemente da quanto sia sofisticato un algoritmo di apprendimento automatico, senza *features* significative non può imparare ed effettuare previsioni in modo efficace. La scelta di esse, quindi, influisce direttamente sul modello predittivo e sui risultati che è possibile ottenere. Pertanto la loro estrazione e la loro successiva selezione sono stati passaggi fondamentali nel processo di classificazione poiché consentono l'associazione dei dati grezzi iniziali con un dato insieme di informazioni accessorie. Queste informazioni aiutano a distinguere le classi di elementi, facilitando così le fasi di apprendimento e generalizzazione.

Nel processo di estrazione delle *features*, il raggio di influenza gioca un ruolo cruciale, definendo l'area entro cui le caratteristiche

del dato influenzano la predizione. Per garantire l'accuratezza della predizione e catturare correttamente le variazioni nel dato geometrico, la risoluzione di 1 cm si è dimostrata efficace bilanciando la quantità di dati acquisiti e l'accuratezza delle informazioni estratte. Un campionamento più fine avrebbe aumentato i tempi di elaborazione senza un guadagno significativo in termini di precisione, mentre uno più grossolano avrebbe rischiato di far perdere dettagli rilevanti.

Il set di addestramento è stato preparato annotando manualmente tutte le classi rintracciate su una porzione limitata e assegnando a ciascuna di esse un indice numerico. Dopo avere poi estratto le *features* geometriche per l'intero dataset, sono stati addestrati diversi modelli predittivi (classificatori di *Machine Learning*) per estendere la segmentazione semantica da piccole porzioni a interi set di dati (fase di predizione). L'algoritmo di *Machine Learning*, quindi, è stato allenato da una singola porzione della nuvola di punti relativa al dataset scelto, sulla quale sono stati annotati manualmente gli indici delle classi individuate in precedenza. Questa prima porzione di nuvola viene suddivisa in due parti: una per il *training* e una per il test, messe successivamente in relazione tra loro per valutare le prestazioni dell'addestramento con un indice di accuratezza. In questa fase l'algoritmo ha elaborato il modello matematico-statistico su cui basare tutte le operazioni di classificazione future, validate su una porzione di modello di *training* che l'algoritmo considera come non classificata (figg. 12, 13, 14).

Per la valutazione del classificatore costruito viene restituita, sotto forma di un riepilogo, la *confusion matrix* (tabella 3), che fornisce una misura del numero di predizioni corrette e non corrette, classe per classe. Le righe della *confusion matrix* mostrano i valori veri – annotati manualmente –, mentre le colonne mostrano quelli predetti per ciascuna classe. Di conseguenza, gli elementi sulla diagonale rappresentano i valori *Veri Positivi* (*True Positive* - TP, cioè istanze del dataset classificate correttamente, mentre gli elementi fuori diagonale rappresentano valori errati: *Veri Negativi* (*True Negative* - TN), *Falsi Positivi* (*False Positive* - FP) e

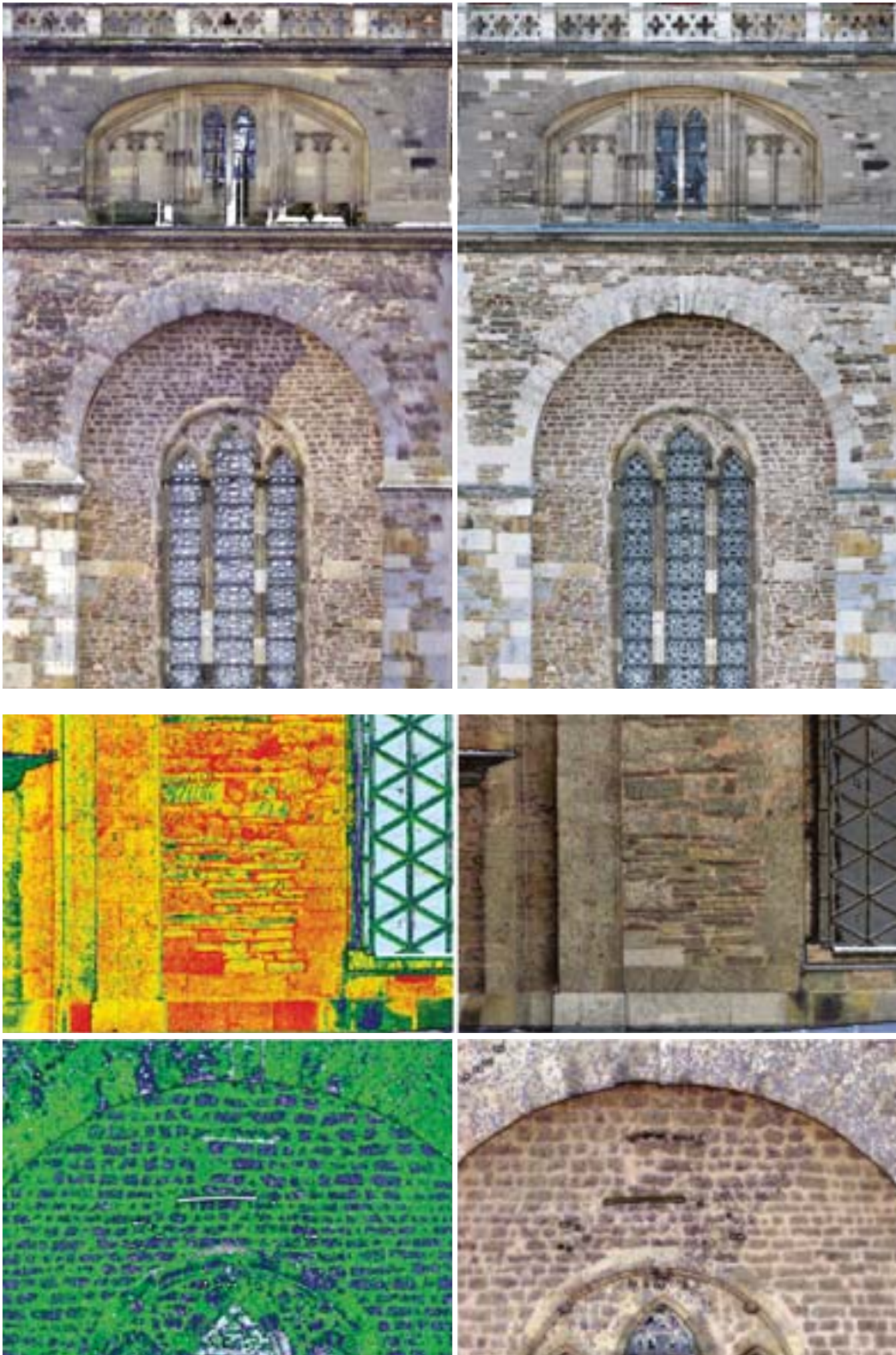
8/ Confronto tra la densità della nuvola di punti da laser scanner, a sinistra, e fotogrammetrica, a destra prima delle operazioni di filtraggio e decimazione. Sebbene la densità di punti della nuvola di punti TLS sia decisamente più densa, risulta tuttavia maggiormente disomogenea (elaborazione di Marika Griffò).

Comparison of points cloud density: TLS points cloud on the left and photogrammetric points cloud on the right before filtering and decimation processes. Although

the TLS points cloud has a significantly higher density, it is more heterogeneous (processing by Marika Griffò).

9/ A sinistra, visualizzazione dei valori di riflettanza di diversi tipi di tessitura muraria; a destra, visualizzazione dei valori radiometrici delle stesse superfici (elaborazione di Marika Griffò).

On the left, visualization of reflectance values of different types of masonry textures; on the right, visualization of radiometric values of the same surfaces (processing by Marika Griffò).



surface or instrument vibrations), positioning factors (like excessive proximity to the surveyed object), and environmental factors (interferences due to obstacles or reflective elements, suboptimal light, and humidity conditions) [Macher et al. 2017]. The second operation involves sampling (decimation) to simplify the management of 3D digital information and further speed up processing and visualization stages, albeit at the cost of some resolution and detail loss. The format type and the choice to segment the data into smaller portions are also critical.

For the various datasets identified within the study object, a semantic segmentation approach based on the Random Forest algorithm⁷ [Grilli 2019; Chehata, Guo, Mallet 2009] was applied case by case: different classes were manually recognized and annotated for each dataset portion. Subsequently, sets of features appropriate to the geometry and morphology of the points cloud were extracted and selected⁸ (fig. 11).

Each dataset portion groups data into multiple homogeneous regions with similar properties. These regions are homogeneous concerning features representing unique, measurable, and differentiable properties. In point clouds, features are typically linked to specific geometric characteristics of the local distribution around points, such as surface normals, gradients, and curvature.

The first application of manual labeling for Aachen Cathedral involved identifying classes related to compositional elements: roofs, elevated structures, entablatures and floors, parapets, openings and accesses, windows, decorative elements, and others.⁹

No matter how sophisticated a machine learning algorithm is, it cannot learn or make compelling predictions without significant features. Therefore, feature selection directly influences the predictive model and the achievable results. Their extraction and subsequent selection were fundamental steps in the classification process, allowing for the association of raw data with a given set of supplementary information. This information helps distinguish the element classes, facilitating the learning and generalization phases.

10/ Individuazione dei sette dataset omogenei per la classificazione semantica (elaborazione di Roberto Barni).
Identification of the seven homogeneous datasets for semantic classification (processing by Roberto Barni).



In feature extraction, the radius of influence is crucial, defining the area where data characteristics impact the prediction. To ensure prediction accuracy and capture variations in geometric data, a resolution of 1 cm proved effective, balancing the data volume acquired with the precision of extracted information. Finer sampling would have increased processing times without significant precision gains, while coarser sampling would risk losing relevant details.

The training set was prepared by manually annotating all classes on a limited portion and assigning each a numerical index. After

Falsi Negativi (False Negative - FN). Sulla base dei numeri o delle percentuali di TP, TN, FP e FN, molti parametri prestazionali possono essere derivati dalla confusion matrix. Precision¹⁰, Recall¹¹, Overall Accuracy¹² e F-measure¹³ sono parametri comunemente utilizzati nella valutazione dei modelli di Machine Learning.

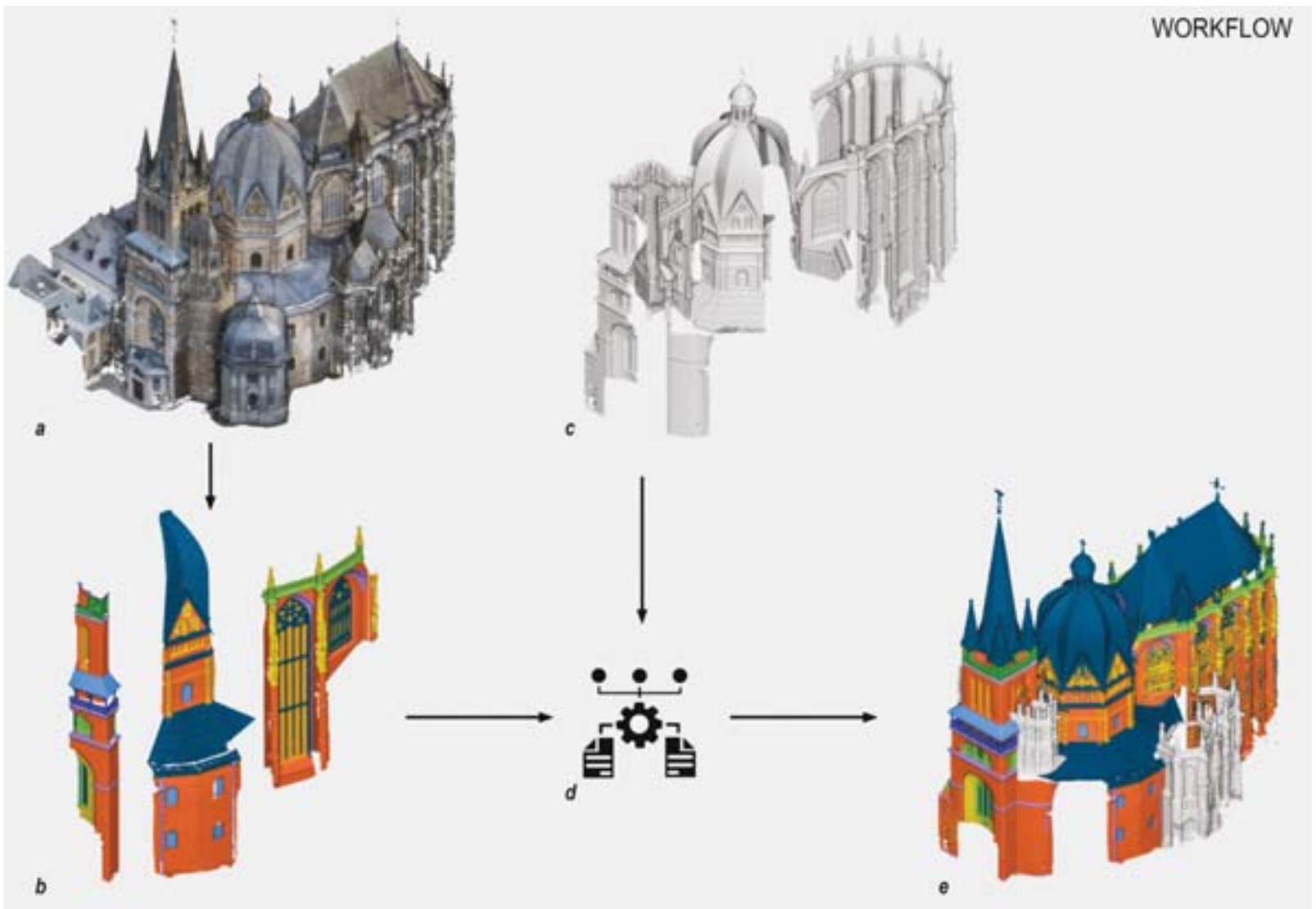
Si è così raggiunta un'accuratezza del 96% nella predizione del dataset dell'area della Cappella Palatina, del 99% nell'area del Westwerk e del 90% nell'area del Coro gotico¹⁴. Un secondo tentativo di classificazione è stato condotto sul riconoscimento delle tecniche co-

struttive nella porzione delle strutture in elevazione in muratura di pietra precedentemente predetta all'interno del dataset del Westwerk, con l'obiettivo di discernere i blocchi quadrati dai blocchetti a filari regolari e irregolari. Nonostante siano state individuate cinque tecniche costruttive, per la classificazione tramite Machine Learning esse sono state accorpate in tre categorie principali: quella dei blocchetti lapidei tenuti insieme da giunti di malta di spessore compreso tra 2 cm e 4 cm, quella dei blocchi o delle lastre lapidee squadrate con giunti di malta molto sottili e quella dei blocchi scolpiti o intagliati, prevalentemente

11/ Schema del workflow inerente alla segmentazione geometry-based del caso studio. a. dataset di input; b. porzioni significative del dataset annotate manualmente; c. porzione di nuvola di punti rimanente non classificata; d. training del modello predittivo; e. output del modello predittivo rappresentato come nuvola di punti classificata (elaborazione di Roberto Barni).

Workflow diagram for geometry-based segmentation of the case study. a. input dataset; b. manually annotated significant portions of the dataset; c. remaining unclassified portion of the

point cloud; d. training of the predictive model; e., the output of the predictive model represented as a classified points cloud (processing by Roberto Barni).



usata per gli elementi decorativi. Questa scelta può essere ben interpretata nel contesto di un approccio multi-scala e multi-risoluzione [Teruggi et al. 2020]. L'approccio multi-scala consente di concentrarsi su aspetti più specifici o più generici in base alla risoluzione richiesta. Accorpare tutte le tecniche in categorie più ampie è stato possibile identificare pattern e tendenze comuni che emergono da una visione complessiva, facilitando la comprensione delle loro caratteristiche principali e delle relazioni reciproche. Questo approccio ha tenuto conto delle similarità tra le tecniche, le dimensioni dei materiali impiegati e

le finalità architettoniche, consentendo di individuarle in maniera più efficace nel contesto dell'analisi automatizzata. Tuttavia, aver seguito un approccio multi-risoluzione offre la possibilità di esaminare tutte le tecniche in modo più dettagliato in futuro, con un livello di precisione maggiore. Questa flessibilità nel classificare e analizzare i dati ha permesso di operare in modo più efficiente e di adattare le tecniche di *Machine Learning* alle specifiche necessità del caso di studio.

Anche in questo caso il processo inizia con la preparazione di un set di addestramento, in cui vengono annotate manualmente le classi

extracting geometric features for the entire dataset, several predictive models (machine learning classifiers) were trained to extend semantic segmentation from small portions to complete datasets (prediction phase). The Machine Learning algorithm was trained on a single portion of the selected dataset's point cloud, where previously identified class indices were manually annotated. This initial cloud portion is split into two parts: one for training and one for testing, which are later compared to evaluate training performance through an accuracy index. At this stage, the algorithm constructed the mathematical-statistical model

12/ Westwerk. Annotazione manuale della porzione di nuvola di punti usata per il training per il riconoscimento geometry based, con le diverse classi annotate e con il risultato della classificazione automatica del modello predittivo (elaborazione di Roberto Barni).
Westwerk. Manual annotation of the points cloud portion is used for training for geometry-based recognition, with annotated classes and the result of the automatic classification by the predictive model (processing by Roberto Barni).

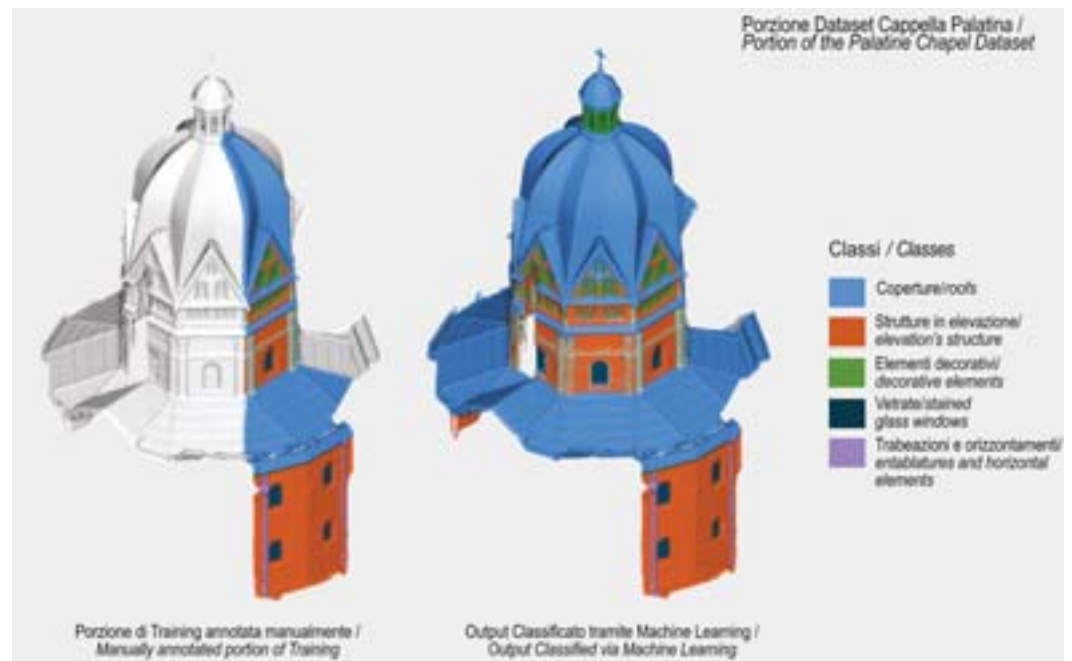
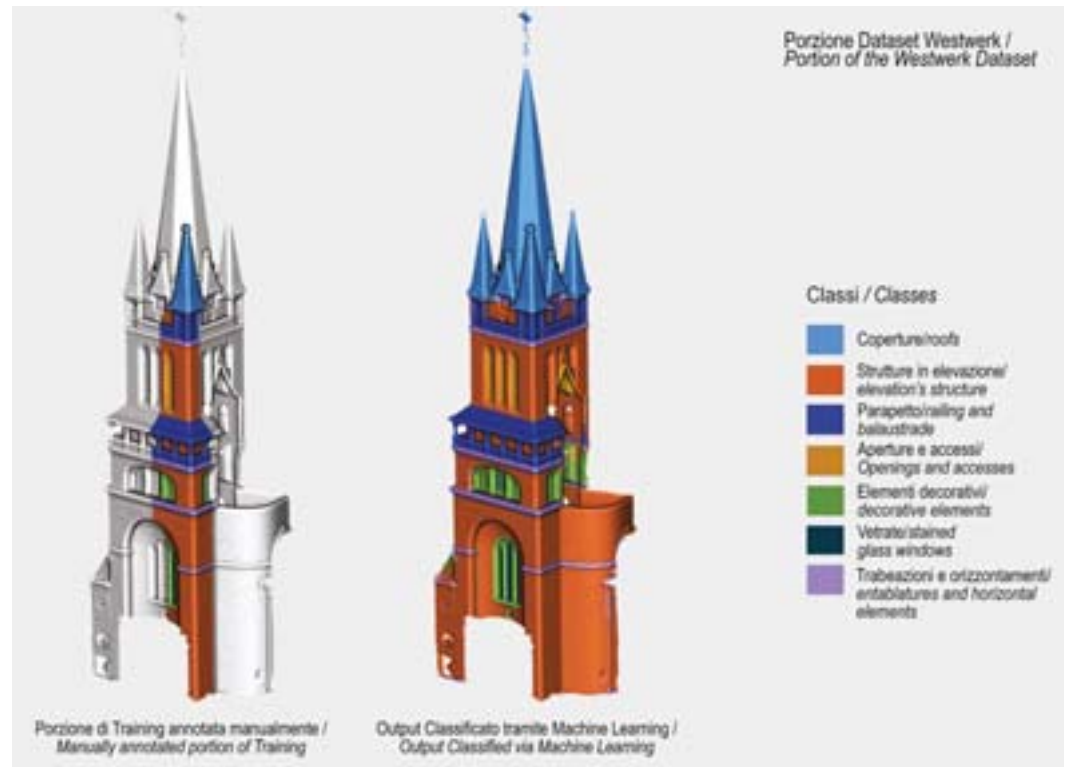
13/ Cappella Palatina. Annotazione manuale della porzione di nuvola di punti usata per il training per il riconoscimento geometry based, con le diverse classi annotate e con il risultato della classificazione automatica del modello predittivo (elaborazione di Roberto Barni).
Palatine Chapel. Manual annotation of the points cloud portion is used for training for geometry-based recognition, with annotated classes and the result of the automatic classification by the predictive model (processing by Roberto Barni).

that would underpin all future classification operations, validated on a portion of the training model considered unclassified by the algorithm (figs. 12, 13, 14).

The confusion matrix, which summarizes correct and incorrect predictions by class, evaluates the constructed classifier. The matrix rows display actual values – manually annotated – while columns show predicted values for each class. Consequently, the diagonal elements represent True Positives (TP), instances correctly classified in the dataset, while off-diagonal elements represent erroneous values: True Negatives (TN), False Positives (FP), and False Negatives (FN). Based on the numbers or percentages of TP, TN, FP, and FN, many performance parameters can be derived from the confusion matrix. Precision,¹⁰ Recall,¹¹ Overall Accuracy,¹² and F-measure¹³ are commonly used parameters in Machine Learning model evaluation.

The prediction accuracy reached 96% for the Palatine Chapel dataset, 99% for the Westwerk area, and 90% for the Gothic Choir.¹⁴

A second classification attempt was conducted to recognize construction techniques in the portion of elevated stone masonry structures previously predicted within the Westwerk dataset to distinguish squared blocks from regularly and irregularly coursed smaller stones. Although five construction techniques were identified, they were grouped into three main categories for machine learning classification: small stone blocks bound by mortar joints 2-4 cm thick, squared blocks or slabs with fragile mortar joints, and carved or chiseled blocks, primarily used for decorative elements. This approach aligns well with a multi-scale and multi-resolution approach [Teruggi et al. 2020]. The multi-scale approach allows focusing on more specific or broader aspects according to the required resolution. By grouping all techniques into broader categories, it was possible to identify common patterns and trends from an overall view, making their primary characteristics and interrelationships more comprehensible. This approach considered similarities between techniques, material dimensions,



corrispondenti alle diverse tecniche costruttive. L'uso delle *features* come RGB e riflettanza è fondamentale in questo processo. I valori

RGB forniscono informazioni dettagliate sulle superfici e i materiali utilizzati nelle tecniche costruttive mentre la riflettanza aiuta a

14/ Coro gotico. Annotazione manuale della porzione di nuvola di punti usata per il training per il riconoscimento geometry based, con le diverse classi annotate e con il risultato della classificazione automatica del modello predittivo (elaborazione di Roberto Barni).
Gothic Choir. Manual annotation of the points cloud portion is used for training for geometry-based recognition, with annotated classes and the result of the automatic classification by the predictive model (processing by Roberto Barni).

identificare le caratteristiche delle superfici come la ruvidità.

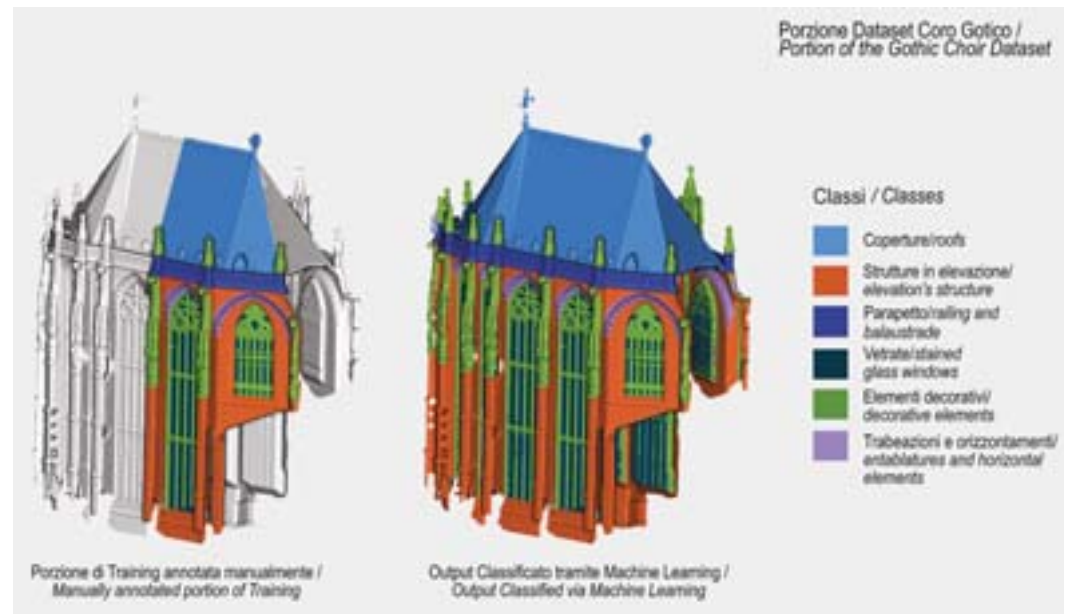
Integrando i valori di riflettanza con altre caratteristiche come il dato RGB, è possibile creare modelli predittivi più accurati e robusti, migliorando significativamente la segmentazione e la classificazione delle tecniche costruttive (fig. 15).

Impiego dei risultati

La sperimentazione condotta ha avuto come obiettivo un ampliamento della conoscenza nell'ottica di una sempre più consapevole gestione e conservazione della Cattedrale. Da questo punto di vista, infatti, la mappatura tridimensionale di una nuvola di punti è da considerarsi il primo passo verso la costruzione di un sistema informativo che permetta di registrare, ad esempio, gli interventi di restauro delle superfici e supportare il processo decisionale di programmazione delle attività finalizzate alla manutenzione. Tale processo deve appoggiarsi su una base di conoscenza adeguata, accessibile e interrogabile per tutti gli attori coinvolti nell'ambito della conservazione del bene.

Oltre a questa finalità, la nuvola di punti segmentata e classificata secondo le tecniche costruttive murarie può essere impiegata come valido supporto sia per lo studio del monumento nell'ambito della ricerca scientifica che ai fini della divulgazione delle informazioni.

Riguardo il primo aspetto, la mappatura 3D delle tecniche costruttive murarie e degli elementi architettonici permette di investigare la loro distribuzione in funzione delle fasi storiche. Ciò può costituire la base per approfondimenti relativi alla disponibilità di materie prime nei vari secoli, all'impiego di specifiche maestranze locali nonché al confronto con gli altri monumenti coevi nella medesima area geografica. Riguardo il secondo aspetto, invece, in un'ottica di diffusione della conoscenza legata a un monumento così fortemente identitario, il flusso di lavoro proposto permette di avvicinare anche un pubblico non specializzato a una descrizione puntuale di certe tematiche attraverso strumenti e soluzioni di visualizzazione più immediati. In quest'ottica, ad esempio, la nuvola di punti tematizzata



potrebbe essere parte di un percorso narrativo che ripercorra l'evoluzione storica del monumento per descrivere sia gli intenti progettuali e le sfide raccolte da architetti e maestranze succedutesi nei secoli sia quelle lanciate dalla contemporaneità.

Conclusioni

Questo contributo ha inteso presentare i primi risultati del processo di tematizzazione semi-automatica della nuvola di punti fotogrammetrica della Cattedrale di Aachen. Tale sperimentazione ha permesso sia di approfondire e testare l'efficacia di algoritmi di *Machine-Learning* nel contesto del patrimonio architettonico sia di contribuire all'approfondimento del livello di conoscenza del bene mediante lo studio delle sue componenti architettoniche e materiche.

Sebbene la fase di studio di elementi, materiali e tecniche sia stata condotta prendendo in considerazione la Cattedrale nella sua interezza, la classificazione algoritmica della nuvola di punti è stata sviluppata in via prototipale solo su alcune delle porzioni omogenee individuate. Una volta testato il metodo, quindi, la successiva fase di sviluppo della ricerca riguarderà la sua generalizzazione [Grilli, Remondino 2020]. Nello specifico, sulla base della mappatura completa degli elementi architet-

and architectural purposes, allowing more effective identification in automated analysis. However, following a multi-resolution approach offers the possibility of examining all methods in greater detail in the future with higher precision. This flexibility in classifying and analyzing data allowed more efficient operation and adapted machine learning techniques to the specific needs of the case study.

Again, the process begins by preparing a training set, where classes corresponding to different construction techniques are manually annotated. Features like RGB and reflectance values are essential in this process. RGB values provide detailed information on surfaces and materials used in construction techniques, while reflectance helps identify surface characteristics like roughness.

By integrating reflectance values with other characteristics, such as RGB data, more accurate and robust predictive models can be created, significantly improving the segmentation and classification of construction techniques (fig. 15).

Application of results

The conducted experimentation aimed to enhance understanding for more informed management and preservation of the

Tabella 3/ Risultato della Confusion Matrix della porzione del dataset dell'area della Cappella Palatina (elaborazione di Roberto Barni).

Table 3/ Result of the Confusion Matrix for the dataset portion of the Palatine Chapel area (compiled by Roberto Barni).

Cathedral. From this perspective, a three-dimensional points cloud mapping serves as the first step toward building an information system that could record, for example, surface restoration activities and support the decision-making process for maintenance planning. This process relies on a comprehensive, accessible, and searchable knowledge base for all parties involved in preserving the asset. Beyond this purpose, the segmented point cloud, classified according to construction techniques, can serve as a valuable resource for monument studies within scientific research and for disseminating information. For research purposes, the 3D mapping of masonry construction techniques and architectural elements allows investigation into their distribution across historical phases. This could provide a foundation for further studies on the availability of raw materials over the centuries, the use of specific local artisans, and comparisons with other contemporary monuments in the same geographic area. From a public outreach perspective, aimed at sharing knowledge about a monument with a strong identity, the proposed workflow enables even non-specialist audiences to access detailed explanations of specific topics through more immediate visualization tools and solutions. For example, the thematized points cloud could form part of a narrative journey that traces the monument's historical evolution, describing both the design intentions and challenges faced by architects and artisans over the centuries and those posed by contemporary needs.

Conclusions

This contribution presented the initial results of the semi-automatic thematization process of the Aachen Cathedral's photogrammetric point cloud. This experimentation allowed for a deeper examination and testing of Machine Learning algorithms within the context of architectural heritage and an enriched understanding of the asset through studying its architectural and material components. While the study phase of elements, materials, and techniques considered the Cathedral as a whole, the algorithmic classification of the points cloud was prototypically developed only for some of the identified homogeneous

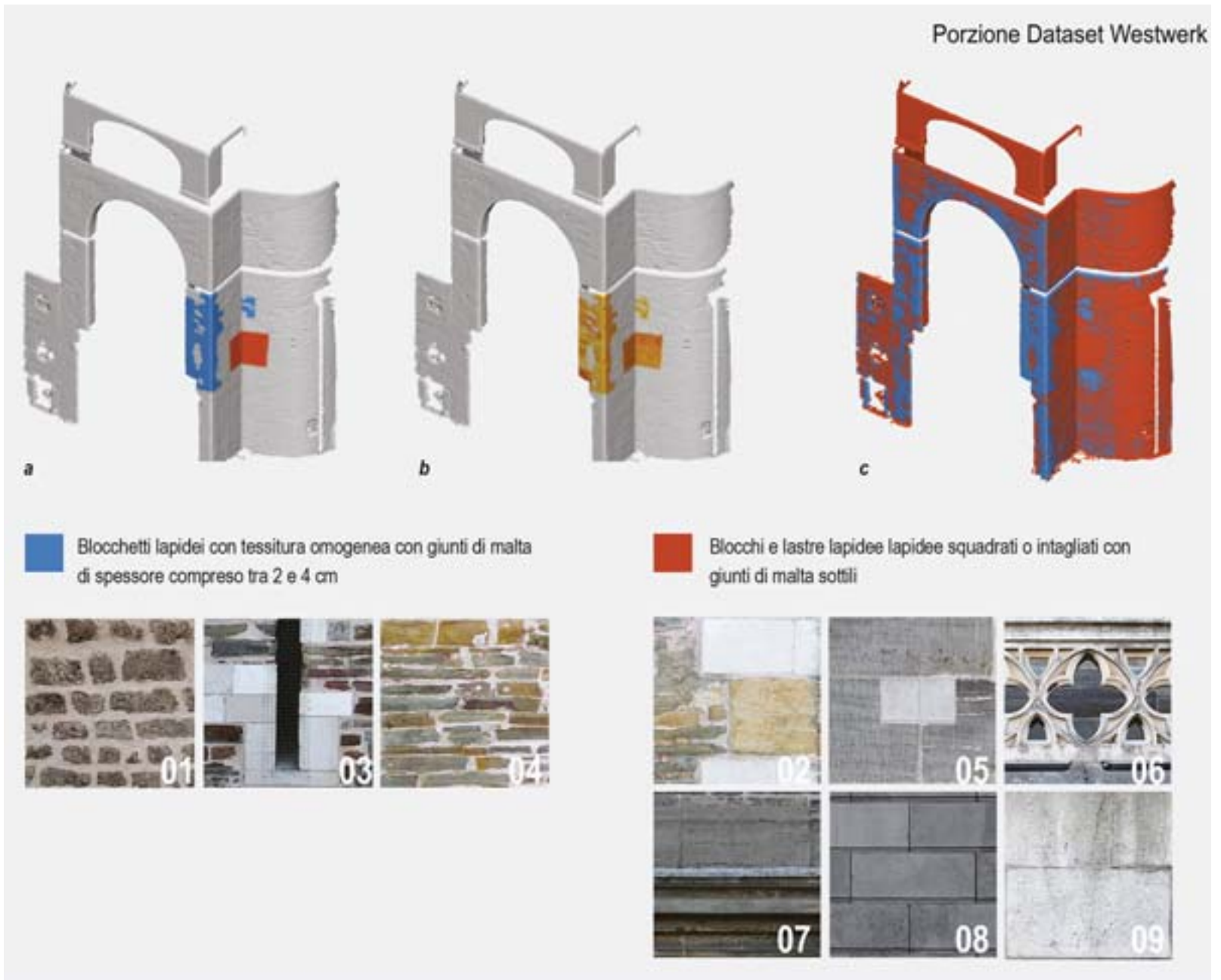
CAPPELLA PALATINA/PALATINE CHAPEL											
CLASSI/CLASSES	Finezze/Windows	Cornicioni/Cornices	Colonne/Columns	Muraria/Masonry	Grondale/Gutters	Lesame/Pillars	Coperture/Roof	Precisione/Precision	Recall	F1	
Finezze/Windows	2598	0	0	168	0	0	0	99%	96%	97%	
Cornicioni/Cornices	0	1378	0	32	0	4	8	94%	98%	96%	
Colonne/Columns	0	0	2308	211	0	0	44	91%	91%	91%	
Struttura in elevazione/Elevation structure	48	21	225	42393	57	112	79	98%	99%	98%	
Grondale/Gutters	0	31	0	179	1906	0	0	97%	89%	93%	
Lesame/Pillars	0	0	0	222	0	4993	26	97%	97%	96%	
Coperture/Roof	0	23	14	91	0	11	4203	100%	100%	100%	
MEDIA/AVERAGE								97%	93%	96%	
WESTWERK											
CLASSI/CLASSES	Loggia/Loggia	Coperture/Roof	Balaustrata e parapetti/Railing and balustrade	Muraria Regular/Masonry	Cornicioni/Cornices	Finezze/Windows	Vitrata/Stained glass windows	Modanature/Moldings	Precisione/Precision	Recall	F1
Loggia/Loggia	7148	0	0	5	1	0	0	0	100%	100%	100%
Coperture/Roof	9	8106	0	12	0	0	0	0	100%	100%	100%
Parapetti/Railing and balustrade	0	0	6536	27	4	0	0	0	100%	100%	100%
Struttura in elevazione/Elevation structure	1	1	10	74428	29	93	0	26	100%	100%	100%
Cornicioni/Cornices	1	0	4	39	13123	0	0	6	100%	100%	100%
Finezze/Windows	0	0	0	48	0	8112	0	0	99%	99%	99%
Vitrata/Stained glass windows	0	0	0	0	0	0	3025	108	98%	97%	97%
Modanature/Moldings	0	0	0	26	2	0	61	13928	99%	99%	99%
MEDIA/AVERAGE								99%	99%	99%	
CORO GOTICO/GOTHIC CHOR											
CLASSI/CLASSES	Sculture/Sculpture	Muraria/Masonry	Traforazioni/Enfiteures	Vitrata/Stained glass windows	Modanature/Moldings	Parapetti/Railing and balustrade	Precisione/Precision	Recall	F1		
Sculture/Sculpture	18016	142	441	948	282	7	83%	91%	88%		
Struttura in elevazione/Elevation structure	1928	8368	610	611	195	9	89%	95%	92%		
Traforazioni/Enfiteures	267	102	6680	843	131	0	79%	83%	81%		
Vitrata/Stained glass windows	632	7812	588	28350	186	0	96%	76%	82%		
Modanature/Moldings	243	207	123	718	3167	0	96%	96%	97%		
Parapetti/Railing and balustrade	13	23	0	0	0	1637	100%	100%	100%		
MEDIA/AVERAGE								96%	96%	89%	

tonici del Westwerk, della Cappella Palatina e del Coro gotico, sarà possibile estendere il riconoscimento e la mappatura delle tecniche costruttive, già sperimentato sul Westwerk, anche alle zone della Cappella Palatina e del coro. Inoltre, la seconda fase di sperimentazione riguarderà la mappatura di tutte le cappelle sulla base delle tipologie di elementi e tecniche

murarie già individuate e classificate. In questo modo la nuvola di punti sarà in grado di registrare lo stato di fatto del monumento e potrà predisporre ad accogliere ulteriori livelli di informazione legati, ad esempio, alla localizzazione tridimensionale delle aree interessate da interventi di restauro o da sostituzione siano essi già realizzati o in programma.

15/ Annotazione manuale della porzione di nuvola di punti usata come training per il riconoscimento di tecniche costruttive e risultato della classificazione automatica del modello predittivo. a. riconoscimento delle tecniche costruttive e annotazione manuale sulla porzione di nuvola di punti; b. estrazione del dato dell'intensità come feature; c. output della predizione delle tecniche costruttive (elaborazione di Roberto Barni). Manual annotation of the points cloud portion used as training for recognizing construction techniques and the result of the

automatic classification by the predictive model: a. recognition of construction techniques and manual annotation on the points cloud portion; b. extraction of intensity data as a feature; c. output of the construction technique prediction (processing by Roberto Barni).



1. La sperimentazione è stata condotta nell'ambito del progetto PNRR PE-CHANGES-SPOKE8- Sustainability and resilience of tangible Cultural Heritage-LT1 Missione 4 "Istruzione e ricerca" – Componente 2 "Dalla ricerca all'impresa" – Investimento 1.3, finanziato dall'Unione europea – NextGenerationEU.

2. Nella completa condivisione del lavoro e dei contenuti dell'articolo, Martina Attenni ha redatto la parte

introduttiva e i paragrafi *Fasi storiche e processi costruttivi* e *Scomposizione per elementi costitutivi e redazione di abachi*; Marika Griffo i paragrafi *Il rilievo della Cattedrale e la preparazione dei dati*, *Impiego dei risultati* e *Conclusioni*; Roberto Barni il paragrafo *Sperimentazione di Machine Learning e analisi dei risultati*.

3. In questo caso si omettono gli aspetti legati all'*utilitas* in quanto la sperimentazione è stata

portions. Once the method is tested, the following research development phase will focus on generalizing it [Grilli, Remondino 2020]. Specifically, based on the complete mapping of architectural elements in the Westwerk, Palatine Chapel, and Gothic Choir, extending the recognition and mapping of construction techniques, already tested in

the Westwerk, to the Palatine Chapel and choir areas will be possible. Furthermore, the second experimentation phase will cover mapping all chapels based on the types of elements and masonry techniques already identified and classified. This approach will enable the points cloud to record the monument's current state and incorporate additional levels of information, such as the three-dimensional localization of areas undergoing restoration or replacement, whether completed or planned.

Translation by the authors, revised by Douglas Pritchard

1. The experiment was conducted as part of the PNRR project PE-CHANGES-SPOKE8 - Sustainability and Resilience of Tangible Cultural Heritage-LT1 Mission 4 'Education and Research' - Component 2 'From Research to Business' - Investment 1.3, funded by the European Union – NextGenerationEU.

2. In complete collaboration on the work and content of the article, Martina Attenni wrote the introductory section and the paragraphs Historical phases and construction processes and Decomposition into constituent elements and creation of catalogs; Marika Griffò wrote the paragraphs Survey of the Cathedral and data preparation, Application of results, and Conclusions; Roberto Barni wrote the paragraph Machine Learning experimentation and results analysis.

3. In this case, aspects related to utilitas are omitted because the experiment was conducted on the exterior surfaces of the Cathedral and the Westwerk, without considering the distribution of spaces and their function inside the building.

4. The two static scanners used for acquisitions are the Z+F Imager 5010 and Z+F Imager 5016. The mobile system used is based on the Z+F Imager 5016 scanner mounted on the Z+F FlexScan® 22 system.

5. The photogrammetry frames were captured using the integrated camera of the DJI Mavic Air2 drone.

6. Weinmann identifies five stages in the semi-automatic learning process: neighborhood selection, feature extraction, feature selection, manual annotation, and classification.

7. Random Forest is one of the most commonly used supervised learning algorithms for classification problems. During the training phase, both the features

condotta sulle superfici esterne della Cattedrale e del Westwerk senza considerare la distribuzione degli spazi e la loro funzione all'interno dell'edificio.

4. I due scanner statici impiegati per le acquisizioni sono Z+F imager 5010 e Z+F imager 5016. Il sistema mobile impiegato è basato su scanner Z+F IMAGER 5016 montato su sistema Z+F FlexScan® 22.

5. I fotogrammi sono stati acquisiti grazie alla fotocamera integrata del drone Mavic Air2 DJI.

6. Weinmann individua cinque fasi per il processo di apprendimento semi-automatico: neighborhood selection, feature extraction, feature selection, manual annotation e classification.

7. Random Forest è uno degli algoritmi di apprendimento supervisionato più utilizzati per problemi di classificazione. Durante la fase di training vengono fornite sia le features che le etichette come input per il modello in modo che possa imparare a classificare i punti in base alle features. Utilizza un insieme di alberi decisionali di classificazione, o decision trees, per ottenere una previsione.

8. Le features sono caratteristiche o attributi dei dati di input utilizzati dagli algoritmi di Machine Learning per imparare e predire gli output. Per gli esperimenti di classificazione delle nuvole di punti vengono impiegati diversi insiemi di features: coordinate decentralizzate, valori radiometrici e features geometriche basate sulla covarianza o sulle normali.

9. La classe "altro" fa riferimento alle grondaie, alle ringhiere e agli elementi non appartenenti alla categoria dei materiali da costruzione.

10. La Precision (Precisione) misura la capacità di fare predizioni corrette tra tutti gli esempi classificati positivamente, ovvero la percentuale di predizioni positive che sono realmente corrette. Si calcola come: $Precision = TP / (TP + FP)$.

11. Il Recall (Richiamo) misura la capacità di un modello di identificare correttamente tutti i casi positivi, calcolato come: $Recall = TP / (TP + FN)$. Indica la percentuale di casi positivi correttamente rilevati e risulta cruciale quando gli errori di falsi negativi sono particolarmente rilevanti.

12. L'Overall Accuracy (Accuratezza complessiva) misura la percentuale di predizioni corrette rispetto al totale, calcolata come: $Overall Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$. Fornisce una visione generale delle prestazioni del modello,

ma può essere fuorviante con classi sbilanciate. Va valutata insieme a metriche come recall, precisione e F-measure.

13. La F-measure (o F1-score) è la media armonica tra Precision e Recall, utile per classi sbilanciate. Si calcola come: $F1-score = 2 \times (Recall \times Precision) / (Recall + Precision)$. Va da 0 a 1, con valori più alti che indicano migliori prestazioni, bilanciando Precision e Recall. È particolarmente utile per considerare sia i falsi positivi che i falsi negativi.

14. Nel processo di sviluppo del modello, il tempo di annotazione ha richiesto circa 3/4 ore, durante le quali sono stati etichettati i dati necessari per l'addestramento e le varie prove per l'estrazione di tutte le features calcolate ad hoc per la buona riuscita della classificazione finale. Successivamente, il tempo di training è stato decisamente più breve, durando circa 3 minuti, grazie all'efficienza del sistema utilizzato. La postazione di lavoro usata è stata una postazione fissa equipaggiata con un processore AMD Ryzen 9 3900X a 12 core, una scheda grafica Nvidia GeForce 3080 con 10 GB di memoria dedicata e 128 GB di RAM che ha permesso di ridurre i tempi di calcolo in modo significativo. Il tempo complessivo per la predizione è stato di circa 1 minuto, rendendo il processo complessivo rapido ed efficiente.

and labels are provided as input to the model so it can learn to classify points based on the features. It uses a set of classification decision trees to make predictions.

8. Features are characteristics or attributes of the input data used by machine learning algorithms to learn and predict outputs. For point cloud classification experiments, different sets of features are used: decentralized coordinates, radiometric values, and geometric features based on covariance or normals.

9. The 'other' class refers to gutters, railings, and elements that do not belong to the construction material category.

10. Precision measures the ability to make correct predictions among all positively classified examples, that is, the percentage of positive predictions that are actually correct. It is calculated as: $Precision = TP / (TP + FP)$.

11. Recall measures the ability of a model to correctly identify all positive cases, calculated as: $Recall = TP / (TP + FN)$. It indicates the percentage of positive cases correctly detected and is crucial when false negatives are particularly important.

12. Overall Accuracy measures the percentage of correct predictions relative to the total, calculated as: $Overall Accuracy = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN)$. It provides a general view of the model's performance but may be misleading with imbalanced classes. It should be evaluated alongside metrics such as recall, precision, and F-measure.

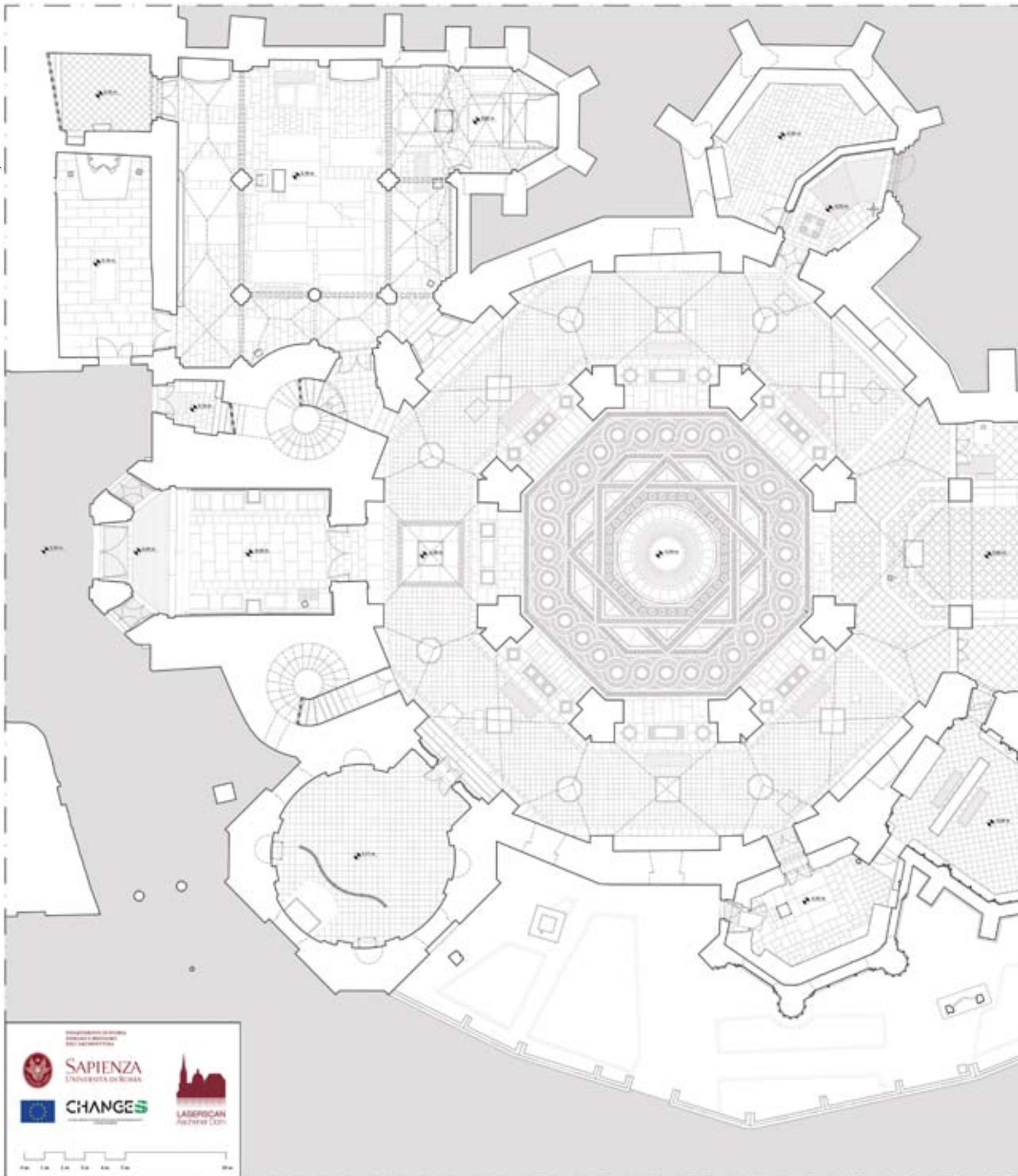
13. The F-measure (or F1-score) is the harmonic mean of Precision and Recall, useful for imbalanced classes. It is calculated as: $F1-score = 2 \times (Recall \times Precision) / (Recall + Precision)$. It ranges from 0 to 1, with

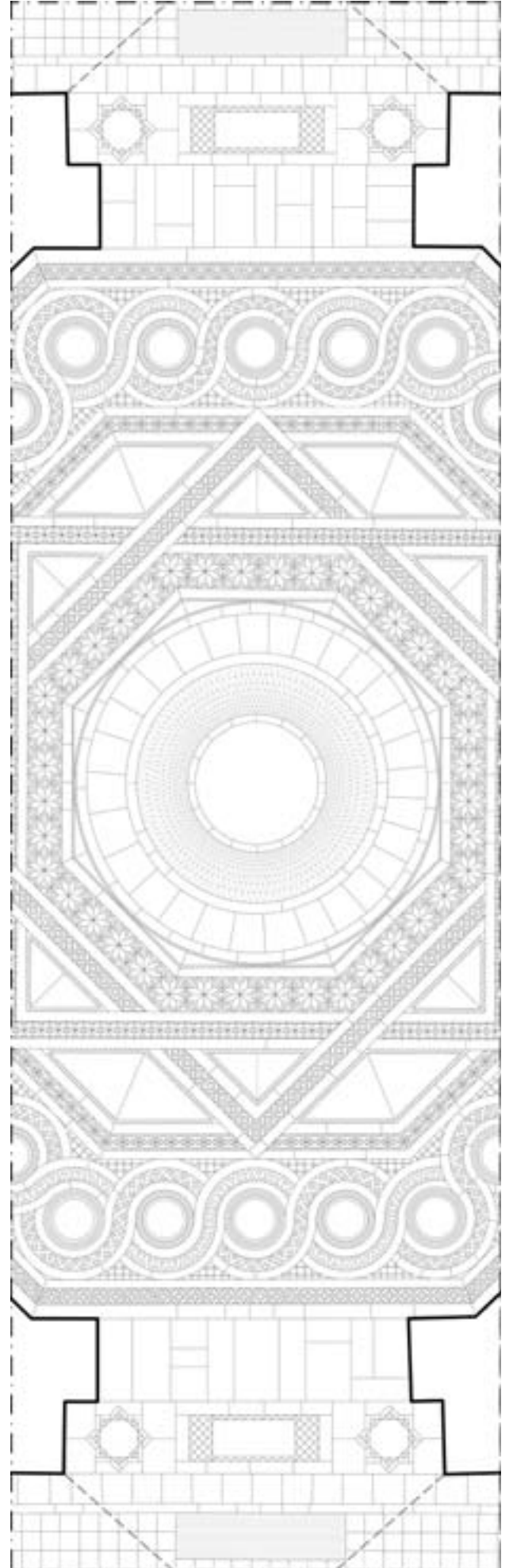
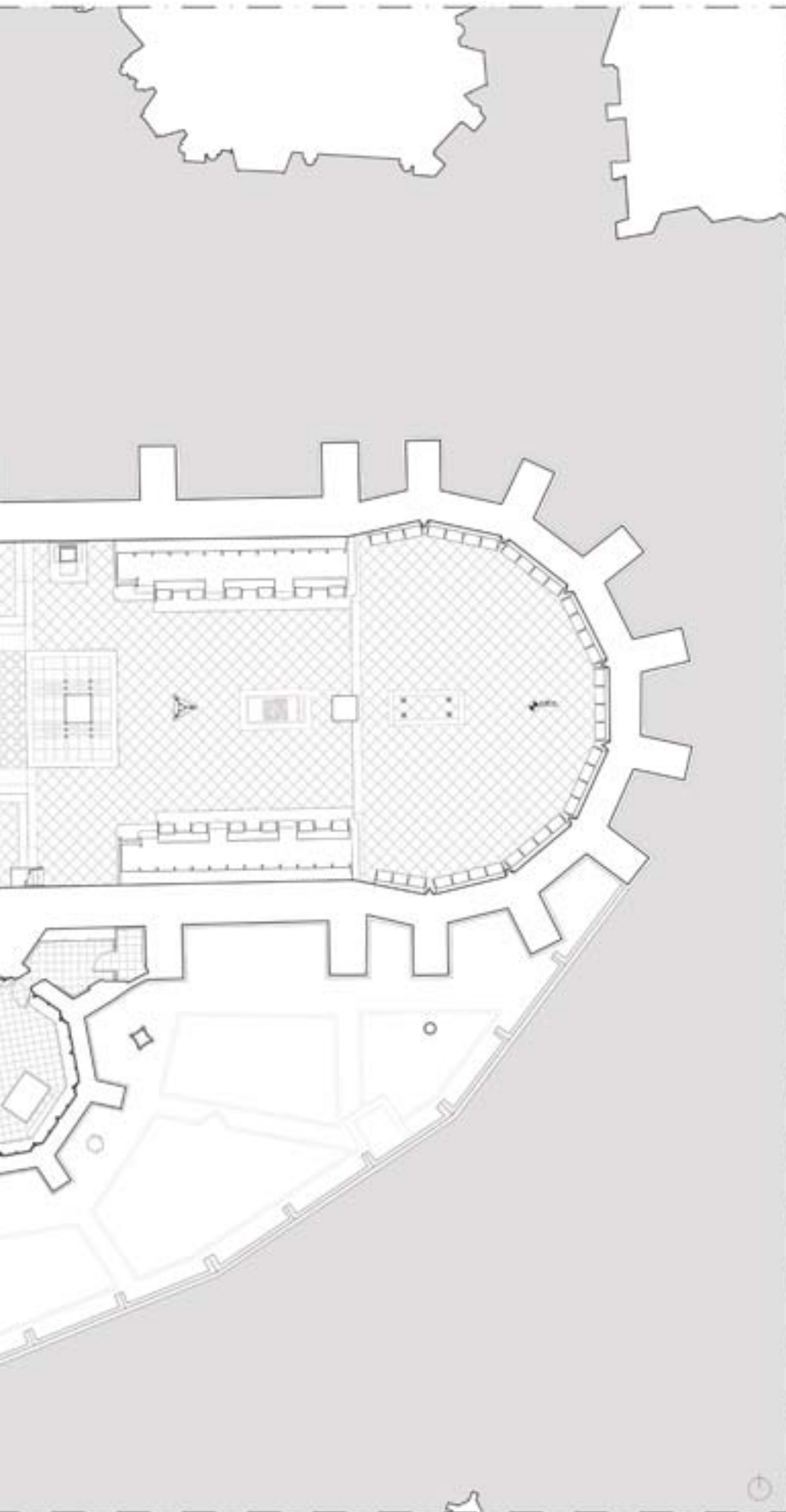
higher values indicating better performance, balancing Precision and Recall. It is particularly useful for considering both false positives and false negatives.

14. In the model development process, annotation time took about 3/4 hours, during which the necessary data for training and various tests to extract all the features specifically calculated for successful final classification were labeled. Subsequently, the training time was much shorter, taking about 3 minutes, thanks to the efficiency of the system used. The workstation used was a fixed workstation equipped with an AMD Ryzen 9 3900X 12-core processor, an Nvidia GeForce 3080 graphics card with 10 GB of dedicated memory, and 128 GB of RAM, which significantly reduced computation time. The total time for prediction was about 1 minute, making the overall process quick and efficient.

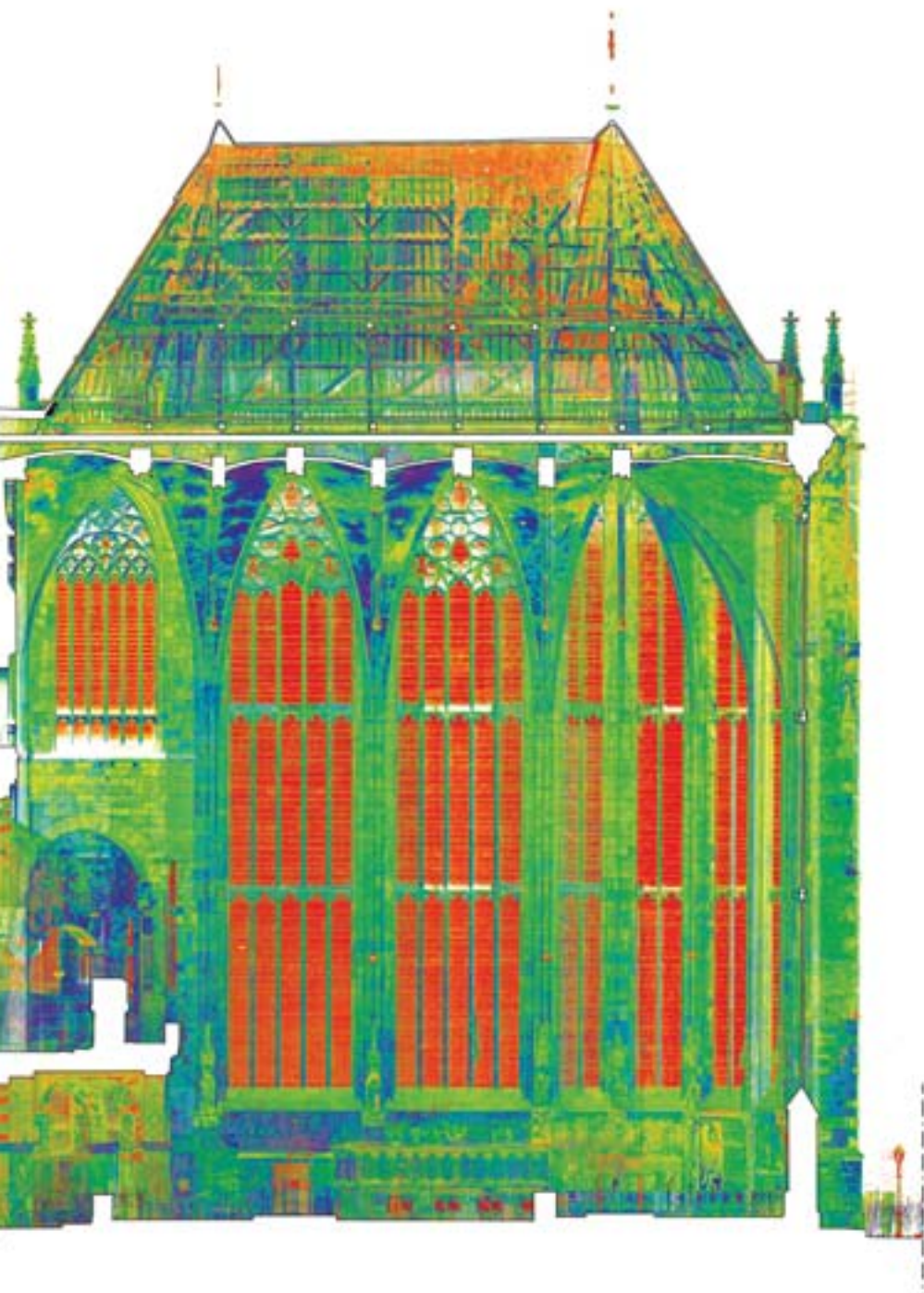
References

- Attenni et al. 2023 = Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Marika Griffio, Carlo Inglese, Yannick Ley, Douglas Pritchard, Guglielmo Villa. The vaulting system of the Palatine Chapel: The Aachen Cathedral World Heritage Site Documentation Project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 119-128. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-119-2023>>.
- Bonelli, Bozzoni, Franchetti Pardo 2009 = Renato Bonelli, Corrado Bozzoni, Vittorio Franchetti Pardo. *Storia dell'architettura medievale*. Roma: Editori Laterza, 2009, pp. 19-21, p. 69. ISBN: 9788842051848.
- Chehata, Guo, Mallet 2009 = Nesrine Chehata, Li Guo, Clément Mallet. Airborne lidar feature selection for urban classification using random forests. In F. Bretar, M. Pierrot-Deseilligny, G. Vosselman (eds). *Laser scanning 2009*. IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 3/W8 - Paris, France, September 1-2, 2009, pp. 207-212. ISSN: 1682-1750. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02384719>>.
- De Luca 2023 = Livio De Luca. Un ecosistema digitale per lo studio interdisciplinare di Notre-Dame de Paris / A digital ecosystem for the interdisciplinary study of Notre-Dame de Paris. *Disegnare. Idee Immagini*, 66, 2023, pp. 16-31. ISSN: 1123-9247. <https://dsdra.web.uniroma1.it/sites/default/files/allegati/2024-06/disegnare%2063_0.pdf>.
- Grilli, Remondino 2020 = Eleonora Grilli, Remondino Fabio. Machine Learning Generalisation across Different 3D Architectural Heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9, no. 6:379, 2020. ISSN: 2220-9964. <<https://doi.org/10.3390/ijgi9060379>>.
- Grilli, Özdemir, Remondino 2019 = Eleonora Grilli, Emre Özdemir, Fabio Remondino. Application of machine and deep learning strategies for the classification of heritage point clouds. In *Proceeding of The international ISPRS Geospatial Conference 2019, University of Tehran*. 2019. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-447-2019>>.
- Siebigs 2000 = Siebigs Hans-Karl. *Die Ungarnkapelle am Dom zu Aachen. Bauliche Sanierungsmaßnahmen an der Ungarnkapelle des Domes zu Aachen in den Jahren 1991-1994*. Aachen: Thouet, 2000.
- Heckner, Beckmann 2012 = Ulrike Heckner, M.A. Eva Maria Beckmann. *Die karolingische Pfalzkapelle in Aachen*. Rheinland: Wernersche Worms, 2012, p. 100. ISBN: 9783884623251.
- Macher, Landes, Grussenmeyer 2017 = Hélène Macher, Tania Landes, Pierre Grussenmeyer. From Point Clouds to Building Information Models: 3D Semi-Automatic Reconstruction of Indoors of Existing Buildings. *Applied Sciences*, 7, 1030, 2017. ISSN: 2076-3417. <<https://doi.org/10.3390/app7101030>>.
- Maintz 2007 = Helmut Maintz. *Sanierung Anna- und Matthiaskapelle (= Schriftenreihe des Karlsverein-Dombauvereins. Band 9)*. Aachen: Thouet, 2007.
- Maintz 2009 = Helmut Maintz. *Dombaumeistertagung in Aachen 2009*. Aachen: Thouet Verlag, 2009, p. 81.
- Pieper, Schindler 2017 = Jan Pieper, Bruno Schindler. *Thron und Altar, Oktogon und Sechzehneck. Die Herrschaftsikonographie der karolingischen Pfalzkapelle zu Aachen*. Berlin: Geymüller Verlag für Architektur, 2017. ISBN: 9783943164381.
- Pritchard et al. 2023 = Douglas Pritchard, Marika Griffio, Martina Attenni, Roberto Barni, Carlo Bianchini, Carlo Inglese, Yannick Ley. Evolution of recording methods: the Aachen CathedralWorld Heritage Site documentation project. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-M-2-2023, pp. 1241-1249. ISSN: 2194-9034. <<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-1241-2023, 2023>>.
- Schein, Wentzler 2008 = Karl Schein, Roland Wentzler. *Hoffnung und Gewißheit. Aachens Dom und Domschatz in Kriegs- und Nachkriegszeit. Dokumente und Berichte*. Aachen, Thouet, 2008.
- Teruggi et al. 2020 = Simone Teruggi, Eleonora Grilli, Michele Russo, Francesco Fassi, Fabio Remondino. A Hierarchical Machine Learning Approach for Multi-Level and Multi-Resolution 3D Point Cloud Classification. *Remote Sensing*, 2020, 12, no. 16:2598. ISSN: 2072-4292. <<https://doi.org/10.3390/rs12162598>>.
- Weinmann 2016 = Markus Weinmann. *Reconstruction and analysis of 3D scenes*. Springer, 2016. ISBN: 9783319292441.





1/ Planimetria della Cattedrale di Aachen e dettaglio della pavimentazione (elaborazione a cura di Gabriele Giuliani e Francesca Picchio).
Floor plan of Aachen Cathedral and detail of the pavement (elaborated by Gabriele Giuliani and Francesca Picchio).



2/ Sezione longitudinale della Cattedrale di Aachen. Visualizzazione della nuvola di punti con valori di riflettanza (elaborazione a cura di Gabriele Giuliani e Francesca Picchio).
Longitudinal section of Aachen Cathedral. Visualization of the points cloud with reflectance values (elaborated by Gabriele Giuliani and Francesca Picchio).





3/ Prospetto sud della Cattedrale di Aachen. Visualizzazione del modello poligonale (elaborazione a cura di Douglas Pritchard).
South elevation of Aachen Cathedral. Visualization of the polygonal model (elaborated by Douglas Pritchard).

La rivista è inclusa nella Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics), dove è indicizzata nell'Arts & Humanities Citation Index e nel database di Scopus dove sono presenti gli abstract dei contributi.

La selezione degli articoli per *Disegnare. Idee Immagini* prevede la procedura di revisione e valutazione da parte di un comitato di referee (*blind peer review*); ogni contributo viene sottoposto all'attenzione di almeno due revisori, scelti in base alle loro specifiche competenze. I nomi dei revisori sono resi noti ogni anno nel numero di dicembre.

The journal has been selected for coverage in the Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics); it is indexed in the Arts & Humanities Citation Index and abstracted in the Scopus database.

The articles published in Disegnare. Idee Immagini are examined and assessed by a blind peer review; each article is examined by at least two referees, chosen according to their specific field of competence. The names of the referees are published every year in the December issue of the journal.

Gli autori di questo numero
Authors published in this issue

Martina Attenni
 Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 martina.attenni@uniroma1.it

Roberto Barni
 Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 roberto.barni@uniroma1.it

Carlo Bianchini
 Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 carlo.bianchini@uniroma1.it

Marika Griffio
 Dipartimento di Storia, disegno e restauro
 dell'architettura
 Sapienza Università di Roma
 piazza Borghese, 9
 00186 Roma, Italia
 marika.griffio@uniroma1.it

Yannick Ley
 Chair of Architectural History
 RWTH Aachen University
 Schinkelstraße 1
 52062 Aachen, Germania
 yannick.ley@rwth-aachen.de

Douglas Pritchard
 Scott Sutherland School of Architecture
 Robert Gordon University
 Garthdee House, Garthdee Road
 Aberdeen, AB10 7QB, Scozia, Regno Unito
 d.pritchard1@rgu.ac.uk

Jan Richarz
 Domkapitel Aachen
 Dombauhütte
 Klosterplatz 2
 52062 Aachen, Germania
 Klosterplatz 3 / 1.OG

Bruno Schindler
 RWTH Aachen University
 Templergraben 55
 52062 Aachen, Germania
 schindler@ages.rwth-aachen.de

Jan Richarz
L'importanza di un modello 3D
per la Cattedrale di Aachen
*The importance of a 3D model
for Aachen Cathedral*

Yannick Ley
L'evoluzione della Cattedrale di Aachen
in sedici immagini
*The evolution of Aachen Cathedral
in sixteen figures*

Douglas Pritchard
La documentazione della Cattedrale di Aachen:
approcci integrati per la conservazione digitale
utilizzando *Terrestrial Laser Scanning*
e fotogrammetria
*The documentation of Aachen Cathedral:
integrated approaches for digital preservation
using Terrestrial Laser Scanning
and photogrammetry*

Bruno Schindler
La geometria della Cappella Palatina
di Aachen e il sistema di misurazione pratica
applicato in cantiere
*The geometry of the Aachen Palatine Chapel
and the practical measurement system
on the building site*

Carlo Bianchini
Sulle unghie coniche della Cappella Palatina
di Aachen
*The conical vaults in the Palatine Chapel
in Aachen*

Martina Atteni, Roberto Barni, Marika Griffò
Sperimentazioni di *Machine Learning*
per la mappatura della Cattedrale di Aachen
*Machine Learning experiments for mapping
Aachen Cathedral*



**WORLDWIDE DISTRIBUTION
AND DIGITAL VERSION
EBOOK
AMAZON, APPLE, ANDROID**
WWW.GANGEMEDITORE.IT

