

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*

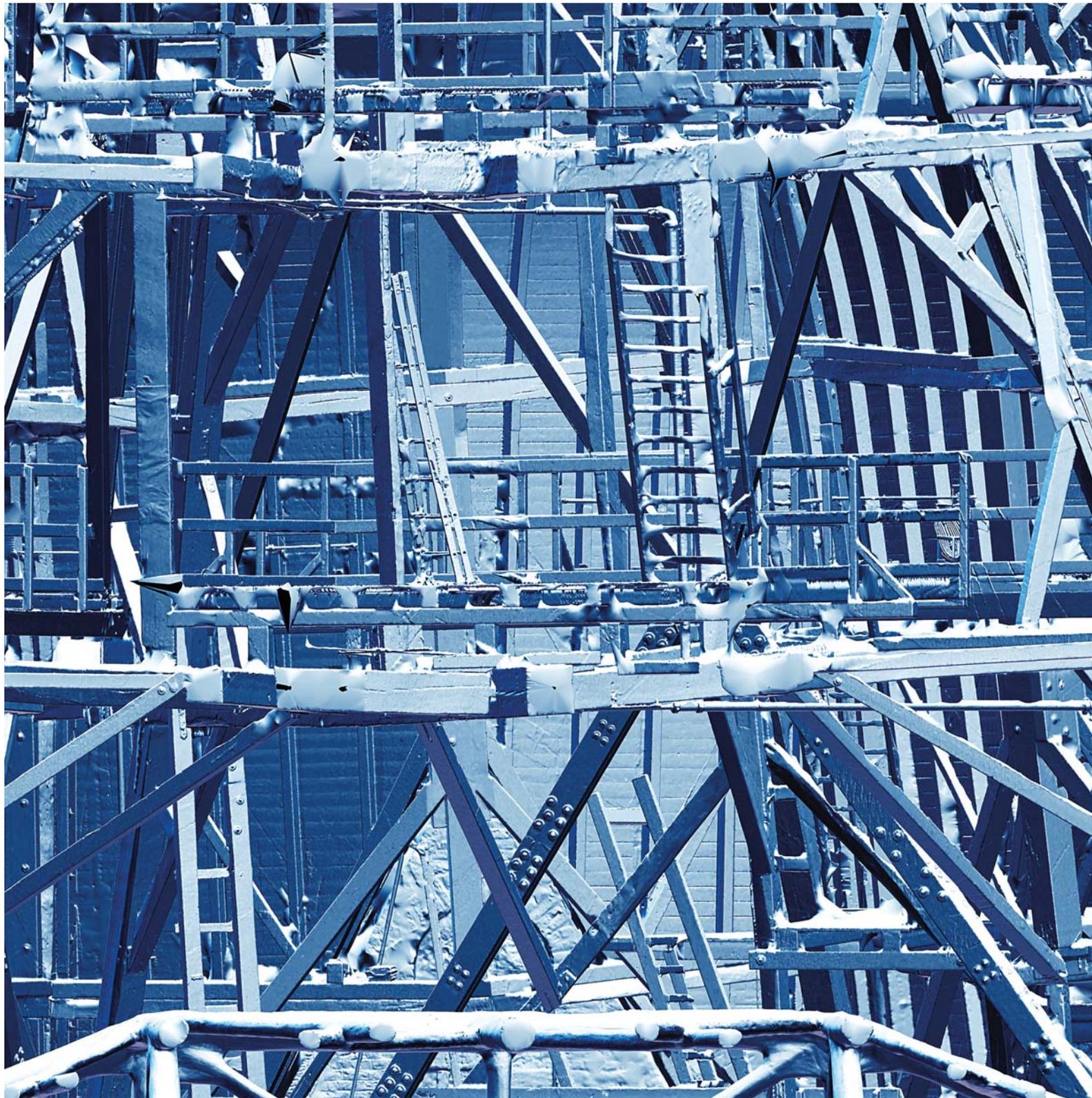
Worldwide distribution and digital version EBOOK
www.gangemeditore.it



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

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

Full english text





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^{spa}
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@emmepromozione.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

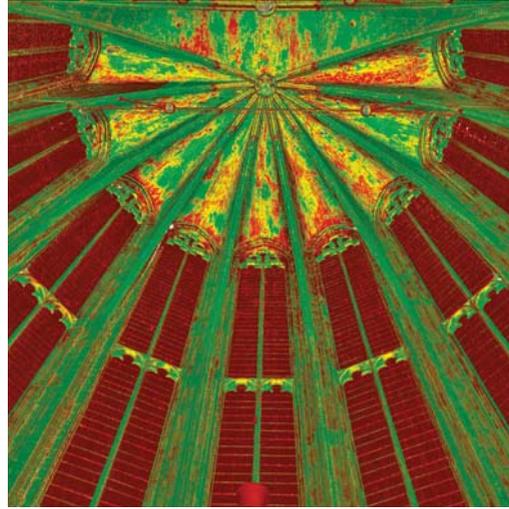
In copertina/Cover

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).*





Martina Attenni, Roberto Barni, Marika Griffo

Sperimentazioni di Machine Learning per la mappatura della Cattedrale di Aachen

Machine Learning experiments for mapping Aachen Cathedral

<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.

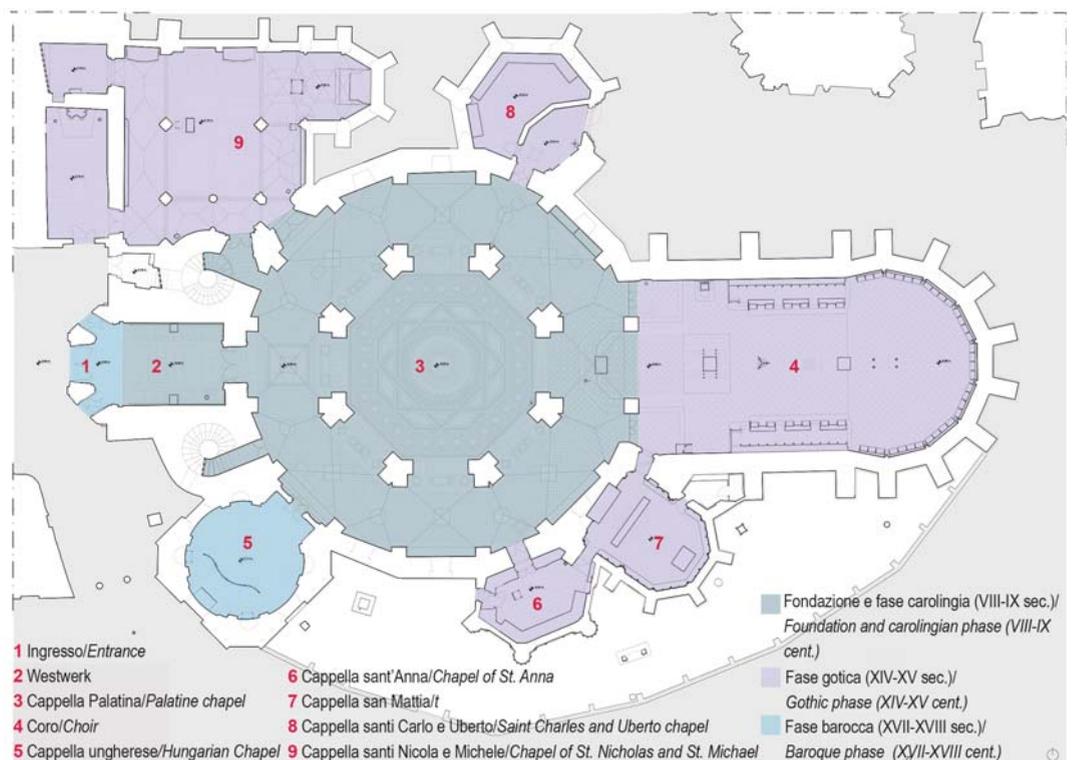
The study presents a procedure to identify the structural elements of the Cathedral and the

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 blausstein, 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,

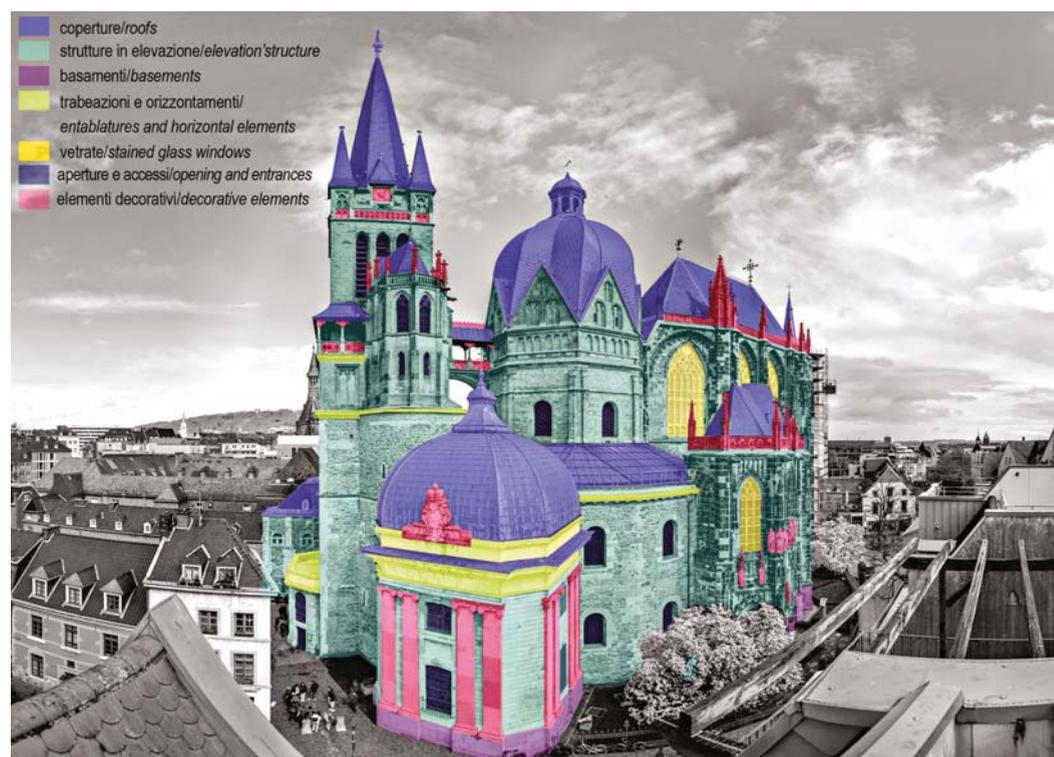


Tabella 1/ Abaco dei materiali e delle tecniche costruttive utilizzate nella zona del Westwerk (elaborazione di Martina Attenni).

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/Apse area of the entrance façade	Pietra calcarea/Limestone	Blocchetti con tessitura omogenea con giunti di spessore di 4 cm/Small blocks with homogeneous texture, joints 4 cm thick	Tessitura omogenea dei ricorsi, lunghezza da 20 a 40 cm, altezza 10 cm/Homogeneous course texture, length from 20 to 40 cm, height 10 cm
02	Cantionali/Cornerstones	blaustein e pietra calcarea/Blaustein and limestone	Blocchi quadrati e pietra irregolare con giunti di spessore > 2cm/Squared blocks and irregular stone with joints > 2 cm thick	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/ 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
03	Feritoie/Arrowslits	Blaustein e pietra calcarea/ Blaustein and limestone	Blocchi quadrati tagliati con precisione, superfici levigate e giunti sottili riempiti di malta/ Precisely cut squared blocks, smooth surfaces, and thin joints filled with mortar	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/ 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
04	Facciata di ingresso, area al di sopra dell'arco/ Entrance façade, area above the arch	Grovacca/ Greywacke	Blocchetti con tessitura omogenea con giunti di spessore di 4 cm/ Small blocks with homogeneous texture, joints 4 cm thick	Tessitura omogenea dei ricorsi, lunghezza da 20 a 45 cm e altezza da 4 a 10 cm/ Homogeneous course texture, length from 20 to 45 cm, height from 4 to 10 cm
05	Facciata di ingresso, secondo livello/ Entrance façade, second level	Calcarea grigia di Heinsberg/ Heinsberg grey limestone	Blocchi quadrati tagliati con precisione, superfici levigate e giunti sottili riempiti di malta/ Precisely cut squared blocks, smooth surfaces, and thin joints filled with mortar	Lunghezza da 60 a 80 cm e altezza 45 cm. Gli inserti chiari furono usati come aggiunta successiva per stabilizzare la struttura/ Length from 60 to 80 cm, height 45 cm. Light-colored inserts were added later to stabilize the structure
06	Loggia/ Loggia	Blaustein/ Blaustein	Blocchi scolpiti e intagliati/ Carved and sculpted blocks	Vierpass (quadrilobo) prefabbricato nella Dombauhütte di epoca gotica/ Vierpass (quatrefoil) prefabricated in the Gothic-era Dombauhütte
07	Trabeazione della superficie ottagonale e delle cornici delle finestre/	Blaustein/ Blaustein	Blocchi scolpiti e intagliati/ Carved and sculpted blocks	Blocchi di dimensioni omogenee posati in opera a corsi alternati/Homogeneous-sized blocks laid in alternating courses
08	Pareti perimetrali/	Blaustein/ Blaustein	Lastre lapidee/Stone slabs	Dimensioni omogenee, lunghezza da 73 a 78 cm, altezza 30 cm/Homogeneous dimensions, length from 73 to 78 cm, height 30 cm
09	Basamento/	Blaustein/ Blaustein	Blocchi quadrati tagliati con precisione, superfici levigate e giunti sottili riempiti di malta/Precisely cut squared blocks, smooth surfaces, and thin joints filled with mortar	Lunghezza da 60 a 100 cm, altezza 60 cm/Length from 60 to 100 cm, height 60 cm

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 quadrati tagliati con precisione, con superfici levigate e giunti sottili (fig. 4: 03, 05), o murature miste nelle quali si alternano blocchi quadrati 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.

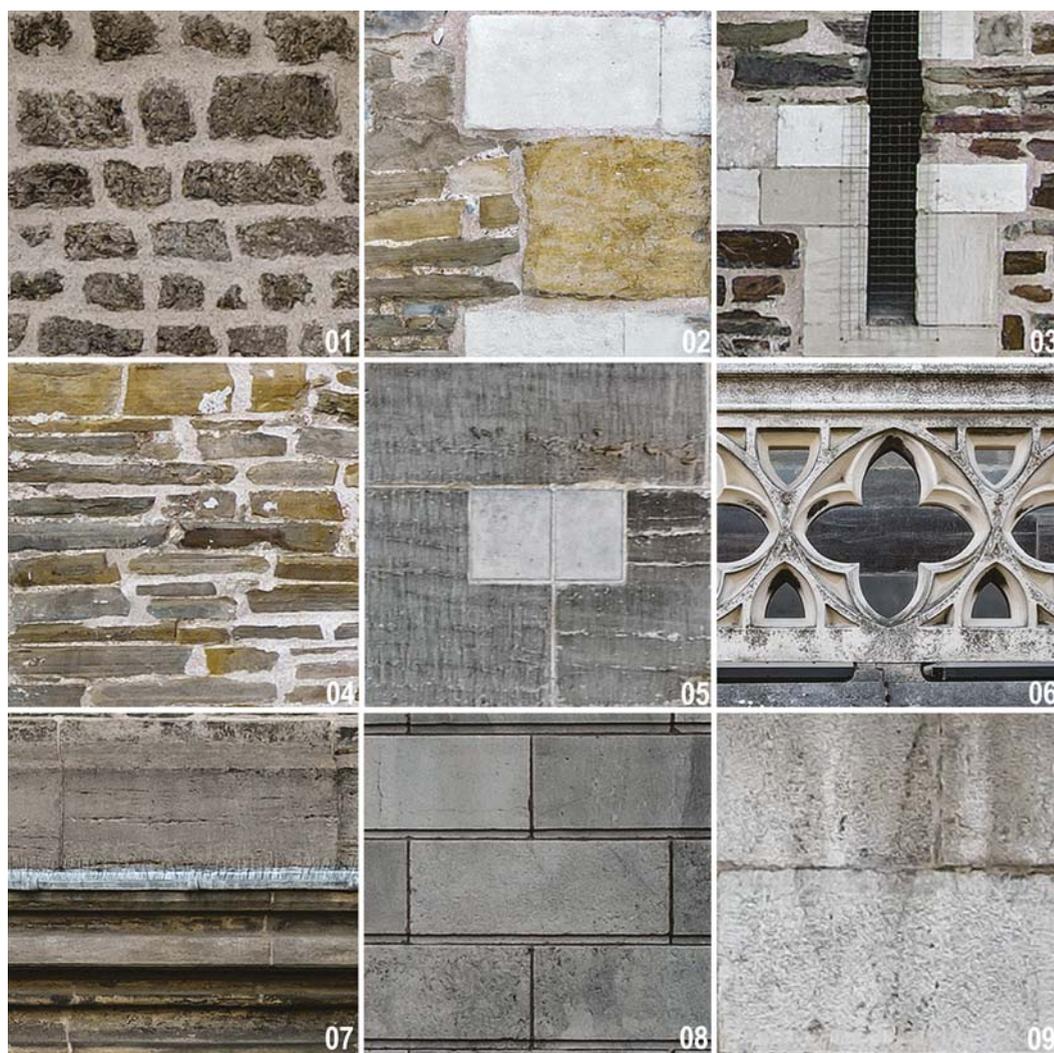
Aesthetically, the building integrates seamlessly with the surrounding context, dominating the square with its bell tower on one side and the Gothic Choir on the other. The sculpted elements, such as architectural orders, the entablature surrounding the Westwerk and the Hungarian Chapel, and Gothic sculptures, 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).

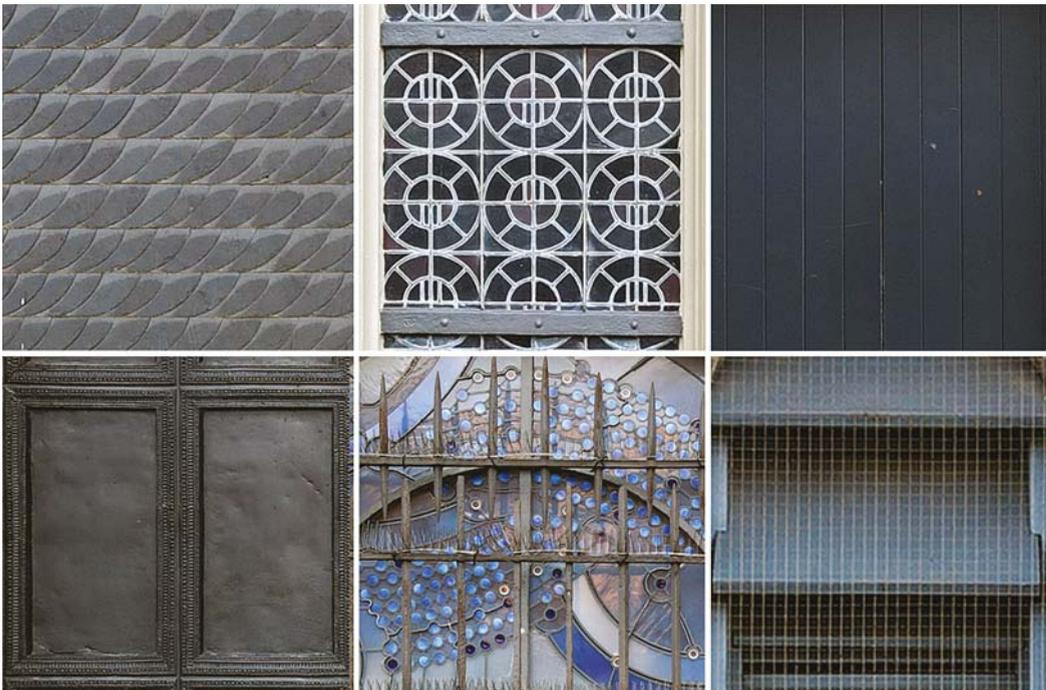
Tale constatazione, come facilmente intuibile, è legata all'accessibilità limitata, se comparata a quella di uno strumento SAPR, di punti di presa delle coperture. Questa iniziale omogeneità dei dati permette di ottimizzare la fase di preparazione della nuvola, essenziale per progettare correttamente 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;

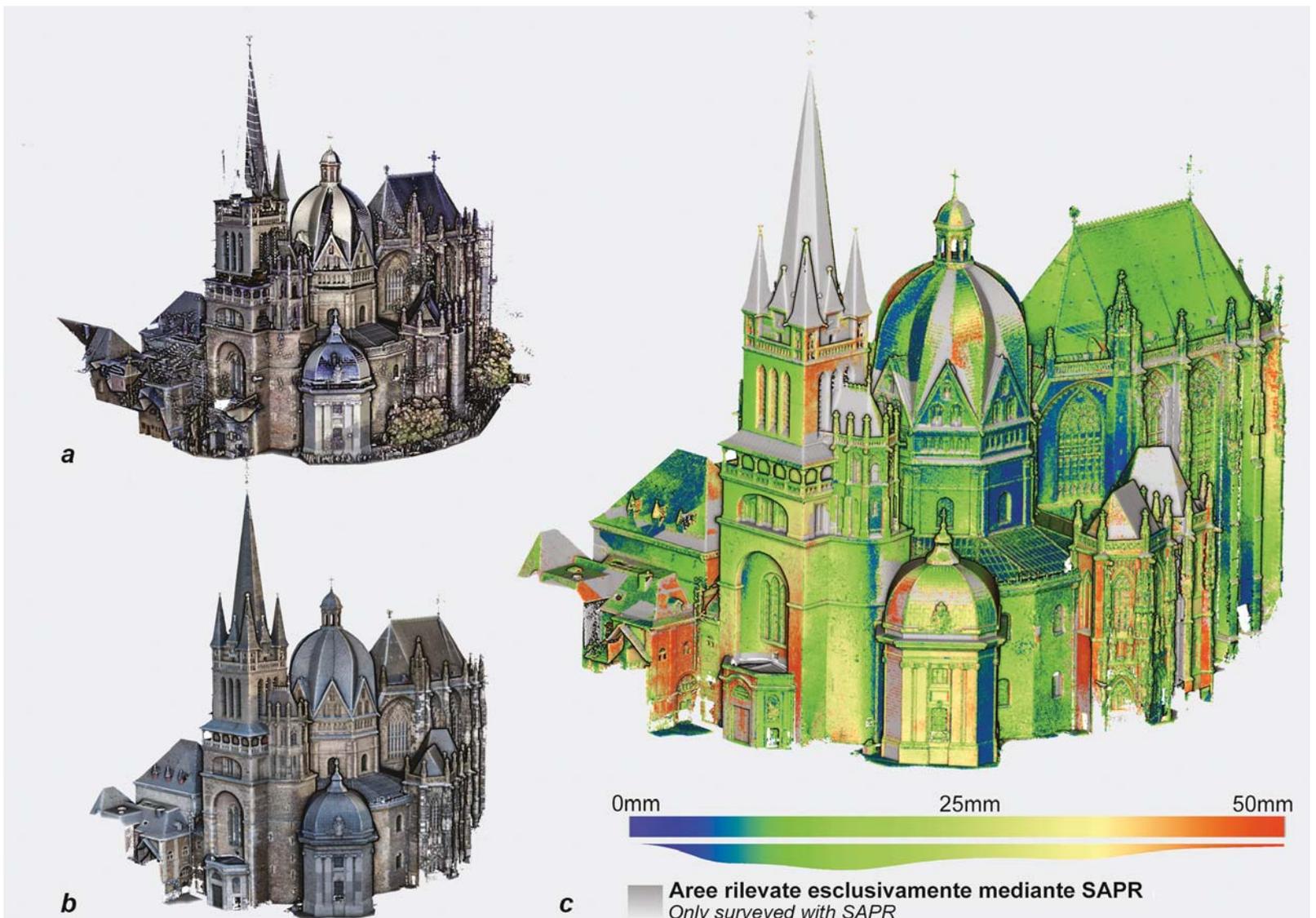


Tabella 2/ Sintesi dei dati nelle diverse fasi di elaborazione riguardanti le nuvole di punti di tutte le superfici esterne della Cattedrale (elaborazione di Marika Griffio).

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

Aree 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;

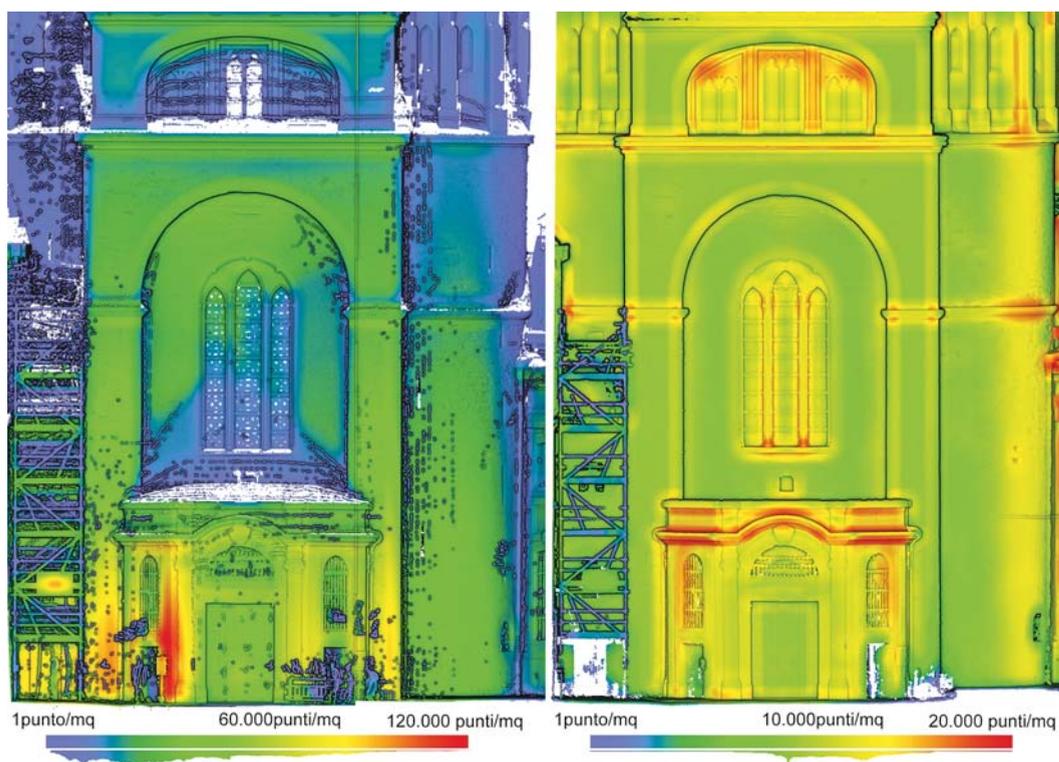
- Chapel of Saints Nicholas and Michael: with stained-glass windows and squared-block pillars;

- 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 Griffio).
Comparison of radiometric characteristics of the TLS points cloud on the left and the photogrammetric points cloud on the right (processing by Marika Griffio).



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

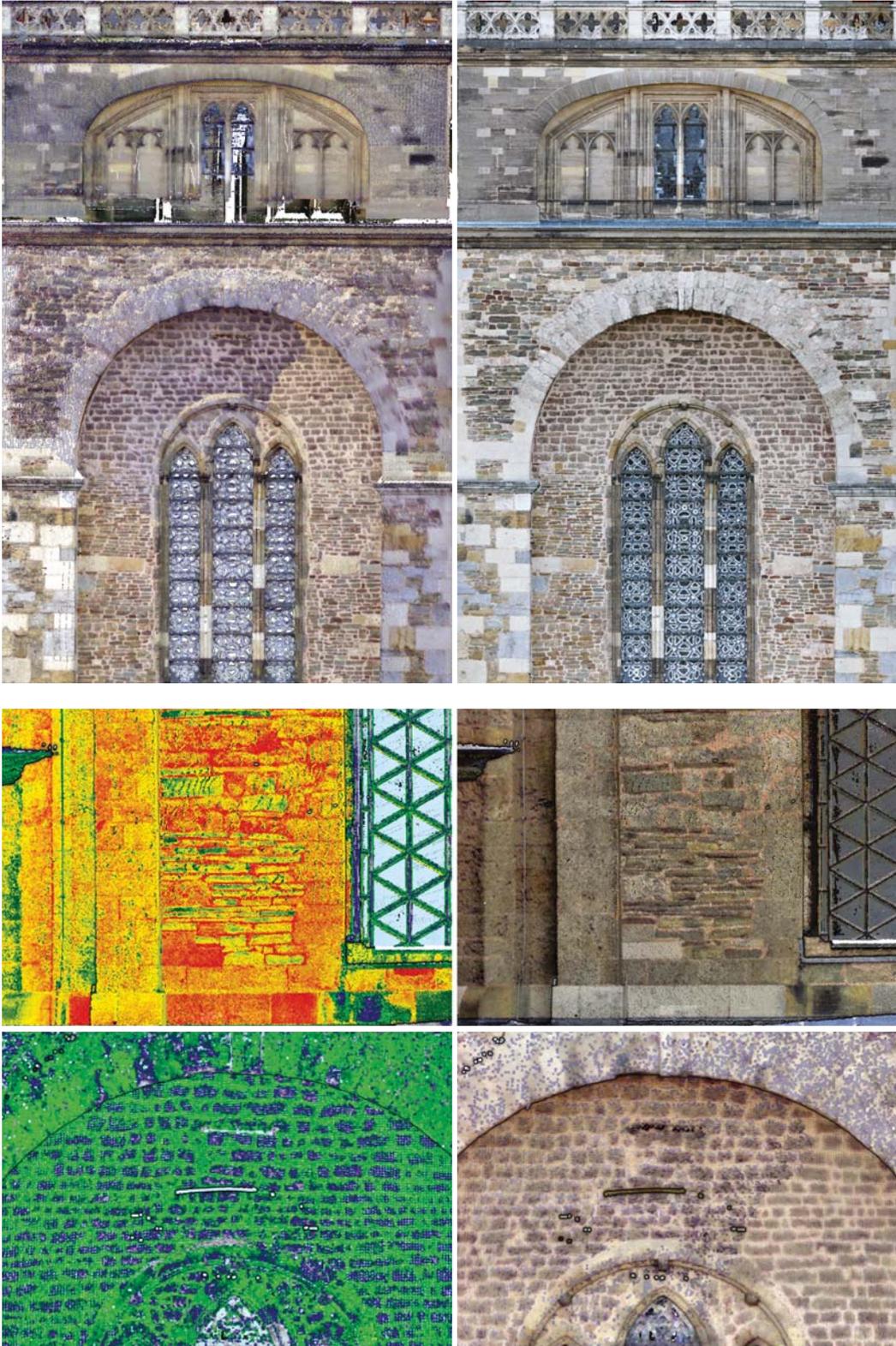
8/ Confronto tra la densità della nuvola di punti da laser scanner, a sinistra, e fotogrammetrica, a destra prima delle operazioni di filtraggio e decimazione. Sebbene la densità di punti della nuvola di punti TLS sia decisamente più densa, risulta tuttavia maggiormente disomogenea (elaborazione di Marika 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.

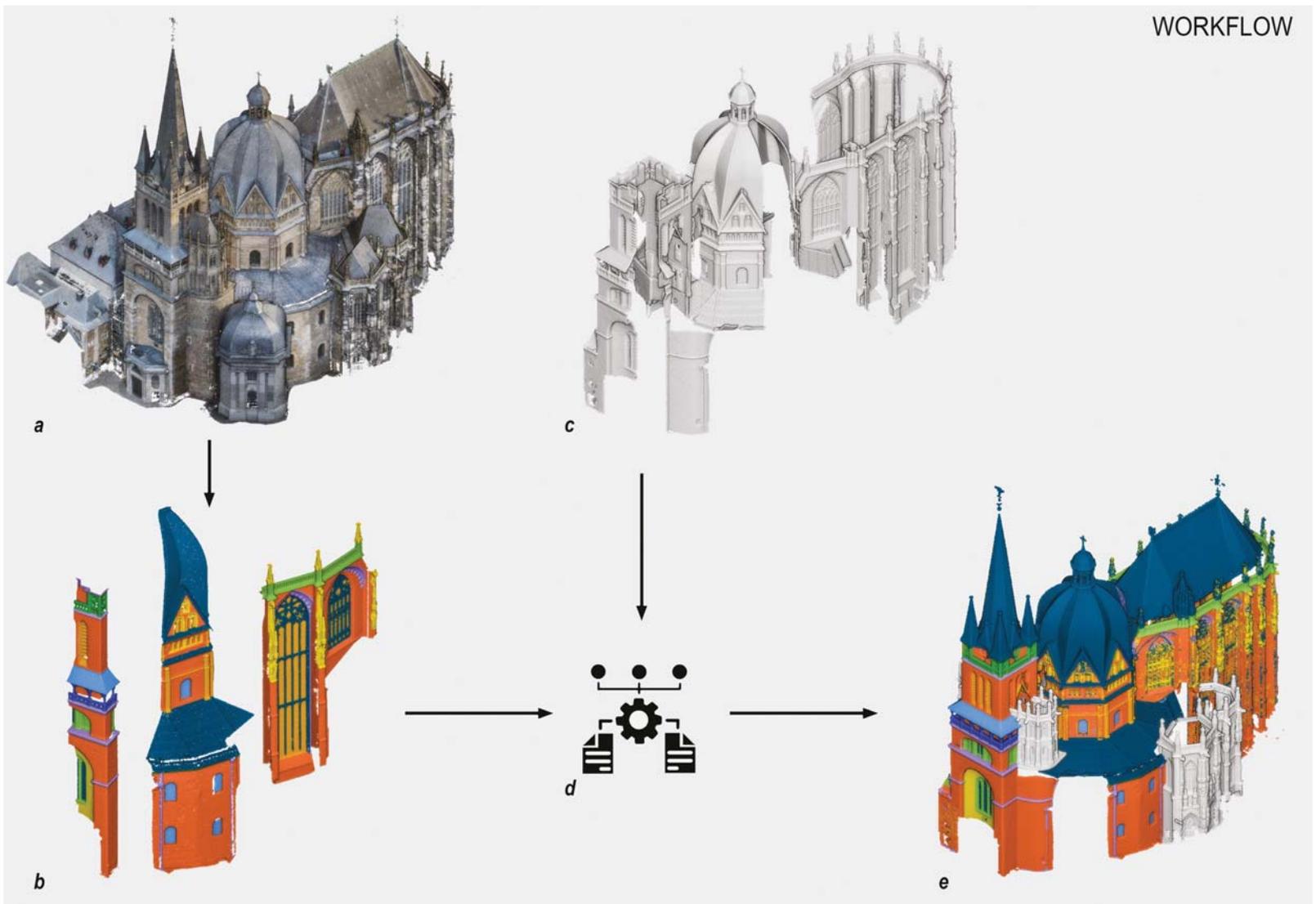
Si è così raggiunta un'accuratezza del 96% nella predizione del dataset dell'area della Cappella Palatina, del 99% nell'area del Westwerk e del 90% nell'area del Coro gotico¹⁴. Un secondo tentativo di classificazione è stato condotto sul riconoscimento delle tecniche co-

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).

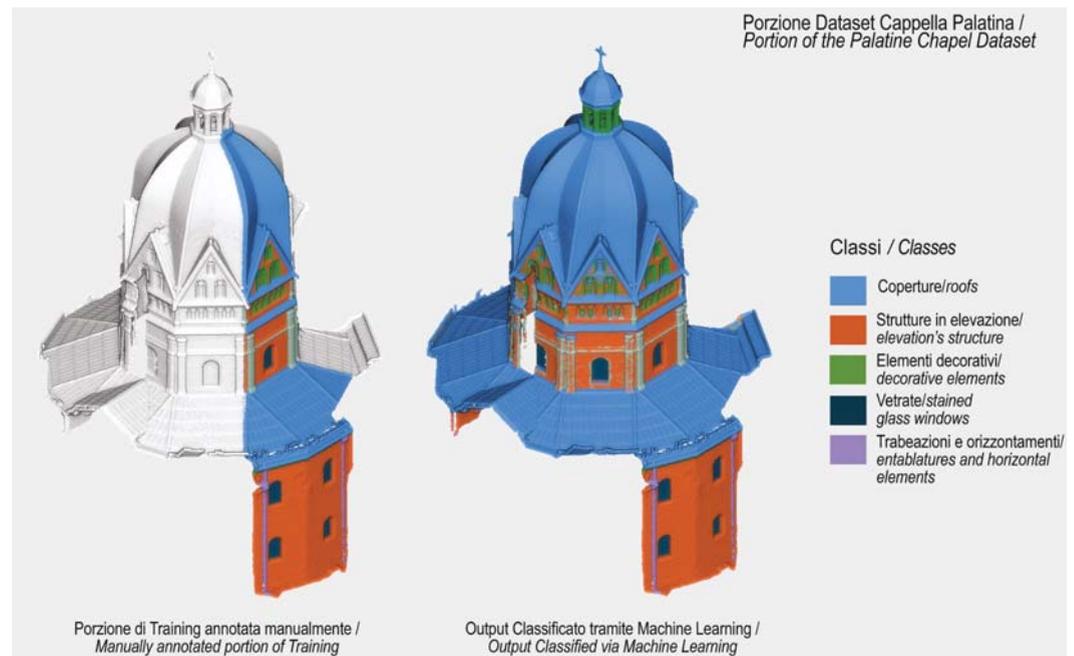
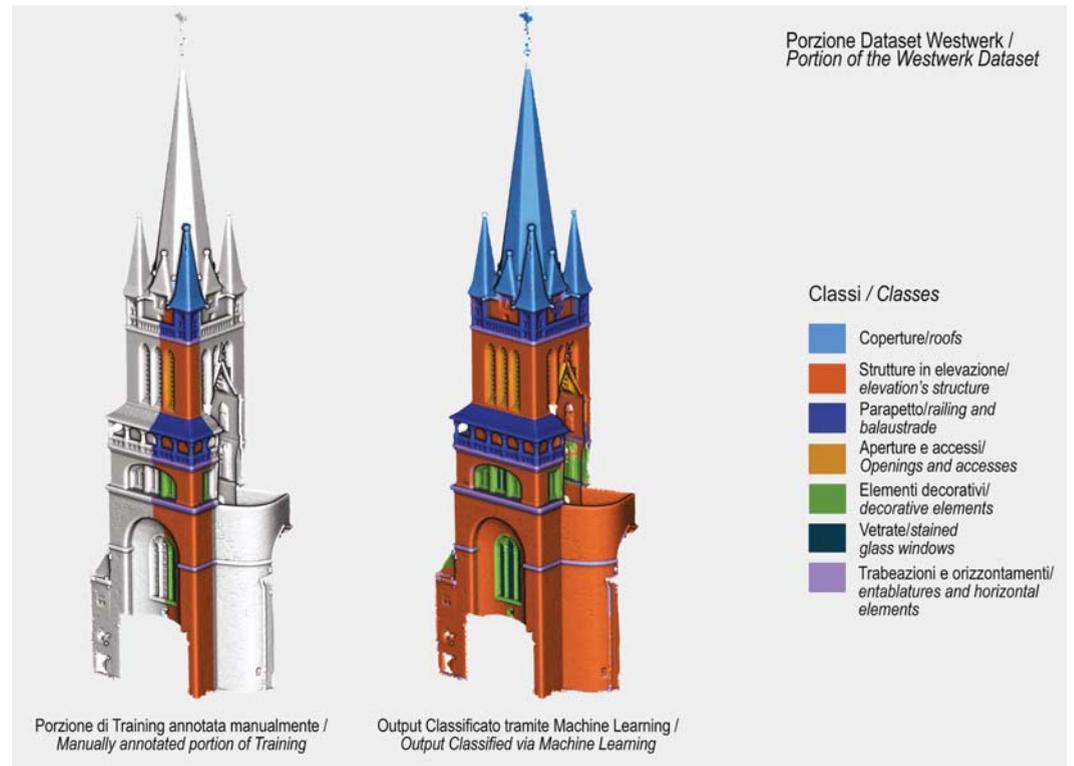
13/ Cappella Palatina. Annotazione manuale della porzione di nuvola di punti usata per il training per il riconoscimento geometry based, con le diverse classi annotate e con il risultato della classificazione automatica del modello predittivo (elaborazione di Roberto Barni).
Palatine Chapel. Manual annotation 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.

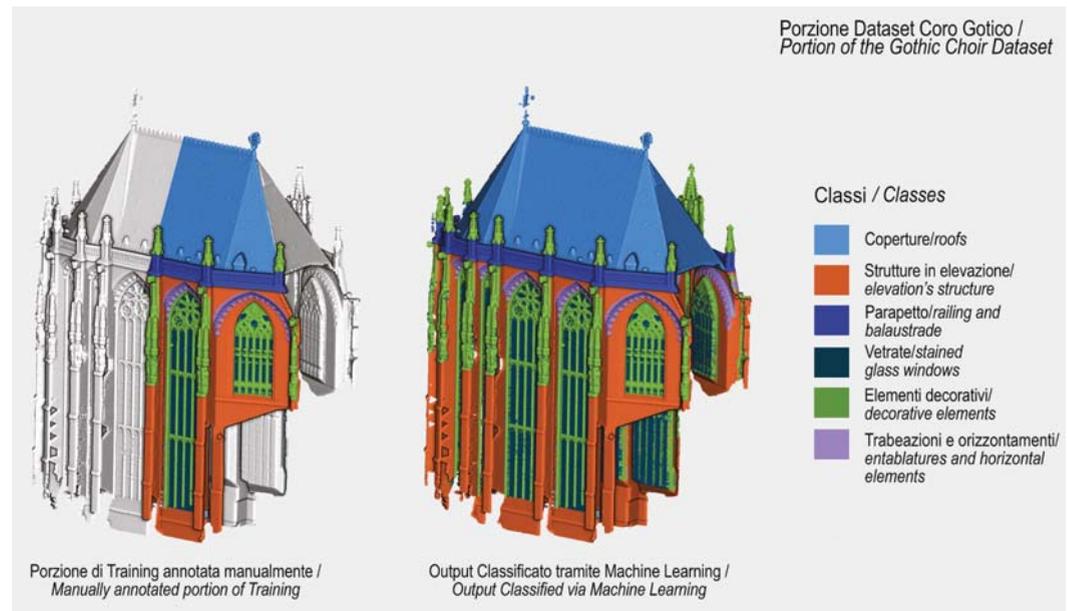
Integrando i valori di riflettanza con altre caratteristiche come il dato RGB, è possibile creare modelli predittivi più accurati e robusti, migliorando significativamente la segmentazione e la classificazione delle tecniche costruttive (fig. 15).

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

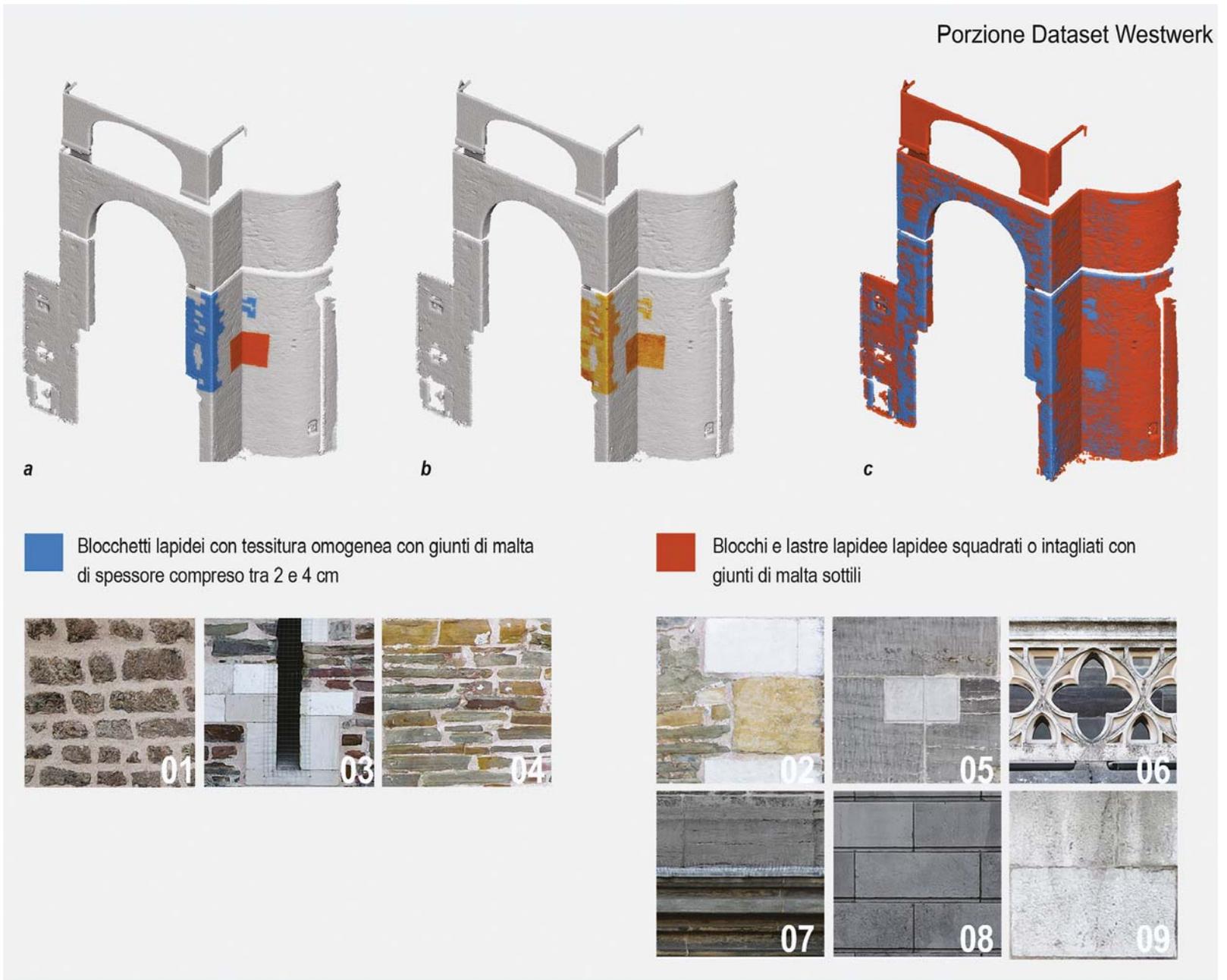
CAPPELLA PALATINA/PALATINE CHAPEL											
CLASSI/CLASSES	Finestre/Windows	Cornicioni/Cornices	Colonnine/Columns	Muratura/Masonry	Grondaie/Gutters	Lesene/Pilasters	Copertura/Roof	Precisione/Precision	Recall	F1	
Finestre/Windows	3598	0	0	168	0	0	0	99%	96%	97%	
Cornicioni/Cornices	0	1378	0	12	0	4	8	94%	98%	96%	
Colonnine/Columns	0	0	2508	211	0	0	44	91%	91%	91%	
Strutture in elevazione/Elevation structure	48	21	225	42393	57	112	79	98%	99%	98%	
Grondaie/Gutters	0	51	0	179	1906	0	0	97%	89%	93%	
Lesene/Pilasters	0	0	0	222	0	4595	26	97%	95%	96%	
Copertura/Roof	0	23	14	91	0	11	42053	100%	100%	100%	
MEDIA/AVERAGE								97%	95%	96%	
WESTWERK											
CLASSI/CLASSES	Loggia/Loggia	Copertura/Roof	Balaustra e parapetti/Railing and balustrade	Muratura Regolare/Regular masonry	Cornicioni/Cornices	Finestre/Windows	Vetrate/Stained glass windows	Modanature/Moldings	Precisione/Precision	Recall	F1
Loggia/Loggia	7148	0	0	5	1	0	0	0	100%	100%	100%
Copertura/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%
Strutture 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%
Finestre/Windows	0	0	0	48	0	8512	0	0	99%	99%	99%
Vetrate/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 CHOIR											
CLASSI/CLASSES	Sculture/Sculpture	Muratura/Masonry	Trabeazioni/Entablatures	Vetrate/Stained glass windows	Modanature/Moldings	Parapetti/Railing and balustrade	Precisione/Precision	Recall	F1		
Sculture/Sculpture	18016	142	441	948	282	7	85%	91%	88%		
Strutture in elevazione/Elevation structure	1928	63608	610	615	195	9	89%	95%	92%		
Trabeazioni/Entablatures	267	102	6680	843	131	0	79%	83%	81%		
Vetrate/Stained glass windows	652	7612	588	28550	186	0	90%	76%	82%		
Modanature/Moldings	245	207	125	718	31367	0	98%	96%	97%		
Parapetti/Railing and balustrade	13	25	0	0	0	16767	100%	100%	100%		
MEDIA/AVERAGE								90%	90%	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.

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 Griffo

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**

ISSN 1123-9247



9 771123 924009

4 0068



ISBN 978-884925280-4



9 788849 1252804