

dottoranda  
**MARIKA FALCONE**  
tutor  
prof. arch. **MASSIMILIANO CAMPI**  
cotutor  
prof. **SERGIO DI MARTINO**  
prof. **FLAVIO FARRONI**  
arch. **SERGIO SABBATINI**

**Rilievo predittivo assistito da Intelligenza Artificiale :  
conoscenza e monitoraggio della Cattedrale di San Matteo a Salerno**

Preservare il Patrimonio Culturale dalle incurie del tempo, dal degrado e dagli agenti patogeni è, oggi, uno degli obiettivi che la comunità scientifica si è posta al fine di tutelare e proteggere monumenti e siti storici. Questo importante traguardo ha cambiato radicalmente l'approccio alla conservazione dei Beni Culturali configurando, in modo sempre più diffuso, uno scenario in cui le tecnologie digitali affiancano ed integrano le azioni volte alle attività di tutela, monitoraggio e di valorizzazione del patrimonio. In questo ambito di ricerca, al fine di sfruttare i reali vantaggi di codeste analisi, stanno emergendo sistemi informativi digitali volti ad indagare e monitorare il dato in previsione di eventi futuri. Questi modelli previsionali, che aprono la strada a nuovi approcci metodologici per preservare il patrimonio culturale, sono strettamente legati al concetto di Digital Twin.

dottoranda  
**MARIKA FALCONE**  
tutor  
prof. arch. **MASSIMILIANO CAMPI**  
cotutor  
prof. **SERGIO DI MARTINO**  
prof. **FLAVIO FARRONI**  
arch. **SERGIO SABBATINI**

**Rilievo predittivo assistito da Intelligenza Artificiale :  
conoscenza e monitoraggio della Cattedrale di San Matteo a Salerno**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA  
XXXV CICLO

## Università degli Studi di Napoli Federico II

### Dottorato di Ricerca in Architettura

Settore disciplinare: Tecnologie sostenibili - Recupero e Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente ciclo XXXV

#### Coordinatore del Dottorato di Ricerca

Fabio Mangone

#### Collegio dei docenti

Antonio Acierno  
Roberta Amirante  
Alfredo Buccaro  
Massimiliano Campi  
Mara Capone  
Renato Capozzi  
Alessandro Castagnaro  
Maria Cerreta  
Angela D'Agostino  
Valeria D'Ambrosio  
Pasquale De Toro  
Antonella di Luggo  
Riccardo Florio  
Enrico Formato  
Carlo Gasparrini  
Ferruccio Izzo  
Giovanni Laino  
Laura Lieto  
Mario Losasso  
Andrea Maglio

Fabio Mangone (coordinatore)  
Bianca Marino  
Pasquale Miano  
Francesco Domenico Moccia  
Giovanni Multari  
Lilia Pagano  
Maria Federica Palestino  
Andrea Pane  
Adelina Picone  
Renata Picone  
Maria Rita Pinto  
Carmine Piscopo  
Sergio Pone  
Michelangelo Russo  
Maria Rosaria Santangelo  
Sergio Russo Ermolli  
Antonella di Luggo  
Valentina Russo  
Maria Rosaria Santangelo  
Paola Scala

#### Tutor

prof. arch. Massimiliano Campi

#### Cotutors

prof. Sergio Di Martino, prof. Flavio Farroni, arch. Sergio Sabbatini

#### Ringraziamenti

A conclusione del triennio di dottorato posso dire con estrema gioia che questo percorso è stato molto importante sia per la mia crescita personale che professionale. Per questo motivo desidero ringraziare fortemente tutti coloro che mi hanno sempre supportata. Un ringraziamento speciale va al prof. arch. Massimiliano Campi per aver creduto in me, prima che io credessi in me stessa. Grazie per il sostegno e per tutte le opportunità che mi ha offerto in questi anni. Ringrazio anche le prof. Antonella di Luggo e Daniela Palombra e tutti i colleghi del TirLab per avermi sempre coinvolta in entusiasmati studi e ricerche. Ringrazio il prof. Sergio Di Martino per avermi trasmesso passione per un campo di ricerca del tutto nuovo. Ringrazio l'arch. Sergio Sabbatini e tutti i collaboratori di 3D SCAN per avermi accolta in azienda e per essere stati sempre aperti al confronto. Ringrazio il prof. Flavio Farroni e i ragazzi di Megaride per il costante supporto in ricerche del tutto innovative. Un ulteriore ringraziamento va all'arch. Valeria Cera per avermi incoraggiata ed aiutato in ogni momento. Ringrazio con estrema gratitudine i miei genitori e mia sorella. Infine, ringrazio Lorenzo, il mio futuro.

*Ai miei genitori  
con estrema gratitudine*

## Indice

<b>Introduzione</b>	15
I. Scenario	
II. Obiettivi e Metodologia	
III. Caso Studio	
IV. Struttura delle tesi	
<b>PARTE PRIMA</b>	
<b>Digitalizzazione e predizione per il patrimonio storico architettonico</b>	
CAPITOLO PRIMO	
<b>Big Data. Dall'architettura ai settori multidisciplinari</b>	
1.1 Il ruolo dei Big Data nel processo decisionale	25
1.2 Massimizzazione e previsione dei Big Data. Campi di applicazione e sperimentazione. Dallo spazio urbano ai settori multidisciplinari	25
1.3 Lo sviluppo delle ricerche nel campo del patrimonio culturale	29
1.3.1 La definizione di patrimonio culturale	29
1.3.2 Dal modello digitale (numerico, informativo e parametrico) al modello previsionale: il Digital Twin per l'architettura	32
1.4 Integrazione dei Big Data.	35
1.4.1 Neo4j: il database a grafo	36

1.4.2 Gestione dei modelli previsionali	36
---	----

## PARTE SECONDA

### Dal Rilievo al monitoraggio continuo dell'architettura

#### CAPITOLO SECONDO

##### Sistemi reality-based

2.1 La digitalizzazione tridimensionale del patrimonio architettonico mediante rilievi reality-based: sistemi image base e range based	45
2.2 Sistemi range-based. Dai sistemi Laser scanning ai Sistemi Mobile Mapping LiDAR e SLAM: principi teorici, strumentazioni, tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati.	47
2.3 Il ruolo della fotografia in architettura	52
2.4 Sistemi image-based. La tecnica fotogrammetrica: principi teorici, acquisizione ed elaborazione dei dati.	53

#### CAPITOLO TERZO

##### Applicazioni di Intelligenza Artificiale

3.1 Il Monitoraggio continuo: la gestione del gemello digitale	63
3.2 Processo di Knowledge Discovery dei dati	65
3.2.1 Time Series Prediction	68
3.2.2 Regressione lineare	70
3.2.3 Valore di R quadro	71
3.3 Decision Tree	72
3.4 Reti neurali	73

## PARTE TERZA

### Il caso applicativo della Cattedrale di San Matteo a Salerno

#### CAPITOLO QUARTO

##### La cattedrale di San Matteo a Salerno tra vicende storiche e trasformazioni nel tempo

4.1 L'egemonia normanna sul territorio campano	81
4.2 Premessa storica	83
4.3 La Cattedrale di San Matteo	85
4.3.1 La traslazione del corpo di San Matteo	85
4.3.2 Vicende storiche nel tempo	86

4.3.3 Montecassino e Salerno. Due edifici religiosi a confronto: affinità costruttive e considerazioni critiche tra i due edifici religiosi	90
---	----

#### CAPITOLO QUINTO

##### La descrizione del manufatto architettonico

5.1 L'ambiente ipogeo: La Cripta	95
5.1.1 La volta e gli affreschi di Belisario Corenzio	98
5.2 La Basilica superiore	99
5.2.1 La Navata centrale e il coro ligneo	99
5.2.2 La Navata meridionale	102
5.2.3 La Navata settentrionale	104
5.3 Il transetto triabsidato	106
5.3.1 I mosaici medievali	108
5.4 L'atrium e la facciata esterna	109
5.4.1 La facciata esterna e la Porta dei Leoni	110
5.4.2 Il Quadriportico	111

#### CAPITOLO SESTO

##### Il progetto di monitoraggio della Cattedrale di San Matteo a Salerno: dal modello digitale alla costruzione del modello previsionale mediante Intelligenza Artificiale

6.1 Definizione del modello tridimensionale	123
6.2 Costruzione del modello tridimensionale multiscalare con sensori high-cost: TLS e MMS	
6.2.1 TLS - Terrestrial Laser Scanner: Faro Focus 3D s120	124
6.2.2 MMM - Mobile Mapping Sistem: NavVis VLX di NavVis.	126
6.2.3 Analisi e comparazione tra sistema statico e sistema dinamico	128
6.3 Costruzione del modello tridimensionale con sensori low-cost	133
6.3.1 Rilievo fotogrammetrico: integrazione dei dati e confronto	134
6.3.2 Analisi e comparazione	136
6.4 Sensore LiDAR Low-Cost: sperimentazioni in corso	138
6.5 Osservazioni critiche	141

#### CAPITOLO SETTIMO

##### Definizione del modello previsionale

7.1 Predizione del degrado con approcci di apprendimento statistico o applicazioni di AI	161
7.2 Verifica del modello previsionale	164

**Conclusioni e Scenari futuri**

167

Fonti delle immagini

175

Fonti bibliografiche

189

### I. Scenario

Preservare il Patrimonio Culturale dalle incurie del tempo, dal degrado e dall'azione di elementi patogeni è, oggi, uno degli obiettivi che la comunità scientifica AEC (*Architectural, Engineering, Construction*) si è posta al fine di tutelare e proteggere edifici e siti storici. Questo importante traguardo ha cambiato radicalmente l'approccio alla conservazione dei beni architettonici configurando, in modo sempre più diffuso, uno scenario in cui le tecnologie digitali affiancano ed integrano le azioni volte alle attività di tutela, di monitoraggio e di valorizzazione del patrimonio. L'introduzione delle nuove metodologie applicative, coadiuvate da apparecchiature e procedure avanzate, hanno infatti segnato l'inizio di una nuova epoca che vive oggigiorno di nuove piattaforme di disseminazione della conoscenza e nuovi modi di trasmettere il sapere. In particolare, gli innumerevoli avanzamenti tecnologici che in anni recenti hanno investito in modo diretto le discipline del Rilievo e della Rappresentazione, consentono una più profonda comprensione di siti ed architetture attraverso la registrazione di una serie di dati dal valore informativo impressionante. Grazie agli sviluppi avvenuti nel campo della sensoristica è infatti possibile acquisire grandi quantità di componenti morfo-metriche che costituiscono il corpus conoscitivo da cui derivare descrittori informativi utili per orientare la diagnostica del restauro. Tuttavia, sebbene si siano compiuti grandi progressi nei sistemi di acquisizione, la numerosità ed eterogeneità delle informazioni acquisite impone

riflessioni legate alla gestione e al monitoraggio dei big data. Ad oggi, le attività diagnostiche richiedono necessariamente l'integrazione di diversi tipi di analisi e rappresentazione del dato nonché l'organizzazione delle informazioni eterogenee su diversi livelli di interrogazione al fine di pianificare adeguati interventi di restauro. In tale ambito d'indagine, le attività di monitoraggio svolgono un ruolo di fondamentale importanza. Mediante queste è possibile ottenere indicazioni sullo stato di salute del manufatto e sulle possibili evoluzioni critiche del suo comportamento. In questa cornice, infatti, al fine di sfruttare i reali vantaggi di codeste analisi, stanno emergendo sistemi informativi digitali volti ad indagare e monitorare il dato, in previsione di eventi futuri. Questi modelli previsionali, che aprono la strada a nuovi approcci metodologici per preservare il patrimonio culturale, sono strettamente legati al concetto di Digital Twin, algoritmi che basandosi su una serie di informazioni che arrivano dalla sensoristica emulano e quindi simulano il comportamento di un oggetto reale fornendo al contempo, mediante database, la conoscenza dei dati in tempo reale. Attualmente non esiste una definizione univoca del termine e i differenti concetti e metodologie dipendono fortemente dal rispettivo contesto di applicazione. Per quanto riguarda, ad esempio, l'ambiente costruito, il concetto di Digital Twin, secondo Simon Evans, è scomposto in sei livelli in cui le tecniche di rilievo costituiscono la base su cui questa metodologia mira ad ottenere la copia virtuale dell'oggetto e sviluppare strategie conservative e manutentive. Sulla base di queste considerazioni, le ricerche attuali nel campo del Cultural Heritage cercano di integrare e coadiuvare i recenti avanzamenti tecnologici che sono stati raggiunti nel campo dell'*Internet of Things* con le moderne tecniche di Intelligenza Artificiale. La loro integrazione consentirebbe il continuo aggiornamento di dati ed informazioni, che possono riguardare, ad esempio, lo stato di degrado di un edificio, la documentazione delle sue modifiche nel tempo, il restauro e interventi di conservazione e così via. Tuttavia, i *gap* procedurali sono molteplici a fronte dei quali si rende necessario una codifica di un processo metodologico di indagine volto, da un lato, all'acquisizione continua di dati morfo-metrici e colorimetrici utili ad alimentare gli algoritmi *AI*, dall'altro, alla gestione e sistematizzazione delle informazioni, attraverso la strutturazione di un *database* per lo *storage* e la predizione dei fenomeni di degrado in divenire. In questa prospettiva, una più concreta interpretazione di quanto rappresentato può essere ipotizzata: la predizione dei dati, basata sulla *predictive analytics*, consentirebbe di tradurre il dato grezzo, mediante tecniche statistiche e di machine learning, in *trend* previsionali per determinare la probabilità che un evento possa o meno verificarsi. Nel settore dei Beni Culturali questo tipo di indagine, piuttosto innovativa, può divenire un prezioso strumento di studio per la costruzione di modelli dinamici che interpretano dati

qualitativi e quantitativi per descrivere e monitorare i fenomeni di *alert* supportando, al contempo, gli esperti di dominio nel processo decisionale.

## II. Obiettivi e Metodologia

Il lavoro che segue, collocandosi nel disciplinare del rilievo e della rappresentazione dell'architettura, intende approfondire le tecniche di rilievo strumentale tecnologicamente avanzato per la conoscenza del patrimonio monumentale, al fine di comprendere in che modo tecniche di rilievo rapido e dettagliato, assistite da Intelligenza Artificiale, possano favorire modelli di monitoraggio predittivo in grado di prevedere fenomeni di degrado o l'andamento di parte di essi.

Sulla base delle premesse sopracitate, il proposito generale si articola in più obiettivi:

- i) Approfondire le metodologie di rilievo tridimensionale *reality-based* che meglio rispondono al monitoraggio dell'architettura. In particolare, in questa fase, vengono analizzate le possibilità offerte dalle nuove tecnologie e dalla loro integrazione per la digitalizzazione del modello digitale, punto di partenza delle analisi previsionali.
- ii) Definire una procedura di registrazione dei dati spaziali architettonici capace di coniugare i tempi di acquisizione all'accuratezza e alla precisione geometrica;
- iii) Codificare gli elementi di disturbo che non devono essere presi in esame dalle tecniche di Data Mining.
- iv) Definire la costruzione di modelli predittivi basati sull'applicazione di Intelligenza Artificiale mediante tecniche di regressione lineare;

In risposta alle questioni elencate e al fine di raggiungere gli scopi prefissati, il raggiungimento degli obiettivi è costituito attraverso una metodologia che si suddivide in tre fasi principali:

1. Acquisizione dei dati morfo-metrici: la prima fase della metodologia è incentrata sul rilievo architettonico ovvero sulla acquisizione dei dati tridimensionali, geometrici e colorimetrici, che permettono la costruzione di un modello digitale, *mimesi* dell'architettura oggetto di studio. In particolare, in questa fase vengono valutate limiti e potenzialità delle tecniche di acqui-

sizione di dati 3D individuando le metodologie utili al rilievo previsionale.

2. Codifica delle tecniche di Data Mining: in questa seconda fase vengono analizzate le *Predictive Analytics* attraverso le quali è possibile estrarre valori previsionali dai dati al fine di migliorare e supportare strategie decisionali strategiche, efficienti ed efficaci.

3. Costruzione del modello previsionale: la metodologia si conclude con la strutturazione del modello previsionale. Il modello è basato sul percorso di estrazione della conoscenza noto, nel campo informatico, come Knowledge Discovery Process o KDD. Quest'ultimo è un processo iterativo ed interattivo che ha come obiettivo l'identificazione delle relazioni tra i dati. Inoltre, il modello previsionale richiede una conoscenza a priori sui dati e ha l'obiettivo di classificare gli eventi futuri e cioè di prevedere il valore di un determinato attributo sulla base dei valori assunti da altri attributi noti.

### III. Caso Studio

Per il conseguimento degli obiettivi proposti, le diverse fasi dell'approccio metodologico sviluppatosi nel triennio del Dottorato di Ricerca in Architettura presso l'Università degli Studi di Napoli "Federico II" hanno visto il supporto e la collaborazione attiva di più istituti:

- Il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II" (DIETI).

- Megaride, spin off tra i più prestigiosi dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

- Il Dipartimento di Informatica dell'Università di Oviedo in Spagna.

- 3D SCAN – Smart Survey, azienda italiana specializzata in tecniche di rilievo.

- Up Intelligence, azienda spagnola specializzata in Intelligenza Artificiale.

Come caso studio, la metodologia ha analizzato la Cattedrale di San Matteo che esalta con la sua magnificenza il patrimonio ecclesiastico della città di Salerno.

### IV. Struttura della Tesi

La ricerca è articolata in tre diverse macro-sezioni in cui, definito lo scenario di intervento, vengono trattati i principali temi che coinvolgono il monitoraggio dell'architettura, l'approfondimento di questioni metodologiche per l'acquisizione ed il trattamento dei dati, l'introduzione ai modelli previsionali e alle tecniche di Intelligenza Artificiale e l'applicazione al caso studio.

La prima parte del lavoro definisce lo stato dell'arte sui moderni sistemi di documentazione digitale per i beni culturali, con una panoramica della letteratura sulle tecniche di monitoraggio, applicate ai diversi ambiti d'indagine.

La seconda parte della ricerca è un approfondimento metodologico delle tecniche di acquisizione ed elaborazione tridimensionale dei modelli digitali *reality-based* e dei sistemi Intelligenza Artificiale. Vengono, in particolare, descritti i principi teorici ed operativi dei sensori ottici attivi e passivi. A seguire, vengono approfonditi i fondamenti informatici su cui si basano i modelli previsionali.

Nella terza ed ultima parte della ricerca viene presentato il caso studio individuato nella Cattedrale di San Matteo a Salerno. Dal punto di vista metodologico, il lavoro ha preso avvio dalla disamina delle fonti bibliografiche ed archivistiche. Di seguito, è stata approfondita la conoscenza del manufatto religioso mediante la fase di acquisizione, elaborazione ed integrazione dei dati, ottenuti attraverso un'attenta campagna di rilievo *reality based*: rilievo laser-scanning terrestre, rilievo SLAM e rilievo fotogrammetrico.

L'ultima parte presenta lo sviluppo della costruzione del modello previsionale a partire dai dati acquisiti dal rilievo. Infine, vengono riassunti i contributi della ricerca presentata con la proposta di scenari futuri.

**PARTE PRIMA**  
**Digitalizzazione e predizione per il patrimonio storico architettonico**

La documentazione svolge un ruolo di fondamentale rilevanza per la conoscenza, conservazione e restauro del patrimonio culturale che, nella sua accezione più ampia, è “l'insieme di beni, che per particolare rilievo storico, culturale ed estetico sono di interesse pubblico e costituiscono la ricchezza di un luogo e della relativa popolazione” (Andreotti, 2018). Esso, secondo la definizione riportata dall'articolo 2 del d.lgs. n. 42 del 2004<sup>1</sup> - Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, comprende i “beni culturali” ed i “beni paesaggistici”, rimandando per i primi ai beni che costituiscono interesse artistico, storico, archeologico, etnoantropologico, archivistico e bibliografico e le altre cose individuate dalla legge o in base alla legge quali “testimonianze aventi valore di civiltà”; e per i secondi, ai beni che presentano espressione dei valori storici, culturali, naturali, morfologici ed estetici del territorio (Cortese, 2017). In questa suddetta definizione, è sottolineato il valore del patrimonio, inteso come testimonianza tangibile e intangibile delle vicende storiche, civili, politiche e artistiche di un popolo. Con particolare attenzione al patrimonio storico-architettonico, negli ultimi anni, i tragici eventi che hanno comportato in parte o del tutto la distruzione del patrimonio di diversi popoli, hanno portato la comunità scientifica ad affermare il bisogno di difenderlo. I cambiamenti climatici insieme ai disastri ambientali e antropici sono divenuti oggi una delle minacce più significative. Con l'obiettivo di tutelare e preservare la memoria storica di questi beni, sottoposti a continui cambiamenti ed evoluzioni, le nuove tecnologie digitali tridimensionali rappresentano una efficace risorsa.

In tale ambito d'indagine, il rilievo del patrimonio architettonico costituisce uno strumento fondamentale “per la conoscenza della storia, della città e delle sue trasformazioni e fornisce un supporto insostituibile per ogni intervento sul costruito” (di Luggo 2018, p.17). Nell'era contemporanea, il risultato che si ottiene è un “modello digitale informativo”, che comporta la discretizzazione permanente di caratteristiche morfo-metriche e colorimetriche di un monumento legate ad esso secondo diversi livelli di interattività (De Luca et al., 2011). Ad oggi, il panorama di metodologie e strumenti per l'acquisizione e gestione di tali informazioni è più che mai vasto e le potenzialità di siffatti sistemi informativi sono enormi e in parte comprovati dalla disciplina. Ma al di là delle scelte di carattere puramente operativo, tali strumentazioni, tuttavia, non sono da sole sufficienti a delineare lo stato di “salute” dell'opera. Sono, infatti, necessarie delle attività sinergiche che attraverso la combinazione di una pluralità di fattori eterogenei possono condurre ad un risultato sullo stato effettivo dell'opera e di come può evolvere nel tempo. Per affrontare le sfide future diventerà quindi sempre più importante monitorare lo stato di salute di un monumento. Una procedura lunga e tediosa ma fondamentale per acquisire i dati necessari a stabilire l'avanzamento o meno dei fenomeni di degrado<sup>2</sup>. Comprendere l'evoluzione di un monumento nel tempo aiuta a definire il processo decisionale e supportare una serie di interventi. A questo proposito, sorgono problemi legati al reperimento, all'acquisizione e all'interoperabilità dei dati stessi necessari a sviluppare attività decisionali, subordinate alla definizione di processi che consentano di gestire e trasformare in modo efficiente informazioni eterogenee. In questa cornice, l'avanzamento tecnologico della sensoristica, i Big Data e i modelli digitali giocano un ruolo fondamentale<sup>3</sup>. La loro interazione combina i dati spaziali alla grande mole di informazioni eterogenee che rappresentano la documentazione dei beni culturali. Ai fini dell'analisi risulta imprescindibile il contributo della digitalizzazione del patrimonio che, coadiuvato da applicazioni di Intelligenza Artificiale, permette di potenziare la ricerca e la diffusione dei dati garantendo, al contempo, la predizione e la fruizione degli stessi.

Alcune nozioni e definizioni riguardanti tali concetti vengono trattati in questo capitolo. Nel paragrafo 1.1 e 1.2 viene analizzato il ruolo dei Big Data nel processo decisionale e i campi di applicazione. Mentre, nel paragrafo 1.3 viene sottolineato come il tema della conservazione applicato ai beni culturali si sia evoluto nel tempo, a partire dal quadro legislativo. In seguito, vie-

ne evidenziato l'apporto delle tecniche di rilevamento con applicazioni di metodiche innovative ed indagini integrate utili ad orientare l'indagine diagnostica per il restauro. Infine, nell'ultimo paragrafo 1.4 si pone l'accento, seppur a livello metodologico, sull'archiviazione, gestione ed integrazione delle informazioni eterogenee che caratterizzano, oggigiorno, i Digital Twin.

### 1.1 Il ruolo dei Big Data nel processo decisionale

Prendere delle decisioni basate su evidenze scientifiche, raccogliendo sia dati storici che flussi di dati in tempo reale permette di stabilire un legame tra l'architettura e il suo stato di salute. A partire da questo assunto, il monitoraggio di monumenti e siti trova un campo di applicazione dalla massimizzazione dell'utilizzo dei Big Data, termine con il quale si definisce una mole immensa di dati grezzi, quantificabili in miliardi di Terabyte. Tali dati vanno non solo recuperati ma anche interpretati e organizzati mediante complessi algoritmi. L'attività di incrociare più informazioni viene definita in gergo tecnico Data Mining (Theobald, 2017). Questo processo può essere definito come l'addestramento di dati e consiste in tutte le attività che hanno come obiettivo l'estrazione di informazioni che vanno a costituire il bacino di conoscenza, meglio noto come database, necessario ai fini di analisi predittive (Fig. 1). Un'analisi dello stato della letteratura di settore evidenzia l'esistenza di differenti ricerche dedicate alla predizione dei Big Data, in più domini e discipline.



Fig. 1 - Evoluzione del concetto di Big Data.

### 1.2 Massimizzazione e previsione dei Big Data.

**Campi di applicazione e sperimentazione. Dallo spazio urbano ad altri settori multidisciplinari**

*“Oggi il mondo fisico e quello digitale stanno convergendo (pensiamo ad esempio all'Internet delle Cose - IoT) e questo cambia il modo di progettare e vivere le città, che possono diventare uno spazio di sperimentazione e trasformazione” (Ratti and Claudel, 2017).*

Così Carlo Ratti sottolinea come inevitabilmente le tecnologie influiranno sulle modalità di progettazione della città del domani, trasformata dai progressi dei sistemi digitali e dalla diffusione delle reti.

Fig. 2 – Sperimentazioni di monitoraggio per il progetto di riqualificazione di Trafalgar Square a Londra.



L'utilizzo dei Big Data nel campo della architettura, quindi del rilievo e della comprensione degli spazi e della città, non è una cosa nuova ed esempi in tal senso si hanno già dall'inizio degli anni 2000 (Babar and Arif, 2017). Infatti, le prime sperimentazioni si delineano a partire dagli anni '90 quando lo studio dell'architetto Norman Foster ricevette l'incarico per la definizione di un masterplan chiamato "World Squares for All"<sup>3</sup> per il miglioramento dello spazio pubblico di Trafalgar Square a Londra, considerato allora un luogo poco sicuro<sup>4</sup>. La definizione di tale progetto fu supportata da una serie di analisi dello spazio urbano definite dallo studio Space Syntax<sup>5</sup>. In particolare, in quella occasione furono delineati i flussi del traffico sia pedonale che veicolare, attraverso periodi di osservazione che portarono a strutturare un modello di analisi molto raffinato. Da questa impostazione metodologica, i dati raccolti aiutarono a circoscrivere un nuovo disegno della piazza, tuttora esistente e ampiamente apprezzato (Fig. 2).

Tuttavia, sebbene questo progetto sia stato un precursore nell'utilizzo dei dati a supporto della progettazione architettonica, tale approccio metodologico non è mai divenuto canonico nella definizione degli spazi delle nostre città.

Negli ultimi anni il contributo più grande a questo campo di ricerca è stato dato dal Senseable City Lab del Massachusetts Institute of Technology - MIT di Boston, USA, guidato dall'architetto italiano Carlo Ratti. Con più di 50 progetti di ricerca sviluppati ed elaborati, il Senseable City Lab si pone come ambizioso hub di ricerca nel campo dell'utilizzo di dati, mantenendo un approccio multidisciplinare che fa affidamento non soltanto all'architettura o alla pianificazione urbana, ma anche alla fisica, alla biologia e alla sociologia. Partendo dagli studi elaborati presso il labo-

ratorio di Boston, il gruppo di ricerca, ha avviato i primi studi agli inizi del 2000: in occasione della finale dei Mondiali di calcio del 2006, ad esempio, ha fatto mappare i dati del traffico di telefonia mobile nella città di Roma e li ha esaminati grazie a un cloud ante litteram creato al MIT.

Analizzando il traffico veicolare di New York e i vantaggi dei trasporti condivisi ha aperto nuovi scenari che hanno portato a servizi come Uber. Ad Amsterdam ha trasformato i canali d'acqua in un laboratorio dove

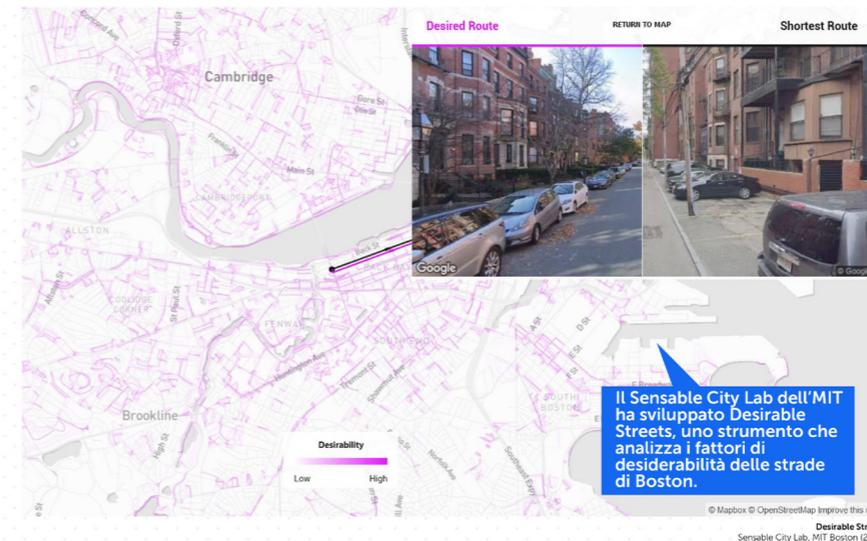


Fig. 3 - Sperimentazione dell'indice di desiderabilità delle strade di Boston, USA.

sperimentare battelli robotici per il trasporto di persone, merci e rifiuti, sfruttando i loro sensori LiDAR per realizzare una mappatura digitale della città (Benson et al., 2022). Inoltre, tra i diversi progetti annoveriamo il monitoraggio dell'Harvard Bridge (Boston, Ma) che è stato condotto, nel 2017, con azioni di crowdsensing (Matarazzo et al., 2018) o quello più recente del Desiderable Street. (Salazar et al., 2021) (Figg. 3- 4). Nel primo caso è stato sviluppato un metodo innovativo ed economico, basato sull'analisi di dati raccolti da normali smartphone, per monitorare le vibrazioni dei ponti stradali. Le informazioni sono state rilevate dagli smartphone dei viaggiatori in transito mediante, dunque, l'utilizzo di sensori mobili. L'idea è stata successivamente testata confrontando i dati raccolti in centinaia di attraversamenti compiuti su due ponti (San Francisco e Boston) con quelli raccolti dalle stazioni di monitoraggio fisse. Nel secondo progetto, invece, sono state utilizzate migliaia di traiettorie di pedoni, ricavate da segnali GPS degli smartphone, per costruire un indice di desiderabilità delle strade di Boston. Tale indice è stato successivamente analizzato confrontando i percorsi effettuati dai pedoni rispetto ai percorsi più rapidi e brevi, andando così a



Fig. 4 – Il monitoraggio dell'Harvard Bridge con azioni di crowdsensing. Acquisizione dati proveniente dagli smartphone degli automobilisti in transito.



Fig. 5 – Esempificazione del concetto di Intelligenza Artificiale applicata nel campo medico.



Fig. 6 – Banca dati del Pan American Health Organization.

registrare la volontà dei pedoni a scegliere determinati percorsi in base alle caratteristiche di questi ultimi. Raccolti i dati, si è proceduto alla previsione del dato stesso. Ne è derivato un modello che ha definito uno scenario particolare: le strade più desiderabili sono quelle che presentano maggiore arredo urbano, varietà di attività economiche e miglior accesso ad aree verdi.

Nella stessa decade, si assiste al proliferare di altre ricerche che cercano di dare risposta, con soluzioni puntuali alla massimizzazione e previsione dei dati. Infatti, la diffusione di modelli predittivi si è posta all'attenzione anche di altri campi d'indagine quali medico, ingegneristico, automobilistico in cui lo stato della letteratura evidenzia notevoli progressi.

Con il termine “modello previsionale” si indicano tutte quelle tecniche in grado non solo di individuare schemi e andamenti ricorrenti nei dati a disposizione ma anche di fornire una previsione di alcune grandezze di interesse. La statistica, come anche il *Machine Learning*, il *Data Mining* o l'*Intelligenza Artificiale*, non solo sviluppa modelli per costruire *trend* previsionali, ma ha anche come obiettivo la quantificazione dell'incertezza della previsione, la quale discende dalla variabilità del fenomeno in analisi.

Un contributo determinante a supporto degli esperti giunge soprattutto dalle tecniche di analisi dati nel campo medico ove la digitalizzazione della medicina promette grandi progressi per la salute globale.

All'interno del dominio sanitario i dati digitali trasformeranno la medicina. Due ricerche particolarmente interessanti tra quelle più recenti sono quelle di Oyeleye e Chen. Il primo studio (Oyeleye et al., 2021) monitora e predice, con tecniche di apprendimento automatico di machine learning, le frequenze cardiache dei pazienti utilizzando i dati generati da dispositivi indossabili a basso costo. Nella seconda ricerca (Chen et al., 2022), invece, le tecniche statistiche dei dati aiutano a ridurre gli errori diagnostici e terapeutici che sono inevitabili nella pratica clinica umana (Fig. 5). Inoltre, nell'ambito sanitario, la maggior parte delle ricerche utilizzano principalmente gli open data della *World Health Organization* (WHO)<sup>6</sup>, ma anche quella della *Pan American Health Organization*, dell'*Eurostat*, della *United Nation Population Division*, dello *United States Census Bureau* e la banca dati del *Japanese National Institute of Populations* che offrono anche strumenti e tecniche avanzate per la loro interrogazione (Fig. 6). Le previsioni e gli andamenti futuri sono essenziali per valutare le strategie di prevenzione, la gestione delle malattie e per pianificare l'allocatione delle risorse. Tuttavia, la maggior parte dei dati sanitari odierni manca

di interoperabilità: i dati sono celati in sistemi incompatibili, spesso difficili da analizzare e interpretare. Ciò comporta un rallentamento del progresso medico, poiché le tecnologie che si fondano su questi database non possono essere utilizzati al massimo delle loro potenzialità<sup>7</sup>.

Molto più numerose sono le sperimentazioni di modelli predittivi in campi come quello dell'energia e dell'industria. Troviamo, poi, applicazioni nel marketing o nel settore *high-tech*. Un esempio di *forecast* del dato è quello dell'azienda italiana Candy<sup>8</sup> che, nel settore manifatturiero, ha adottato strumenti di previsione per prevedere in anticipo l'insorgenza di guasti negli elettrodomestici prodotti. Sfruttando bimonente mole di informazioni fornite dalle moderne lavatrici/lavasciuga, sia relative alle caratteristiche tecniche che alle modalità di funzionamento, i modelli predittivi hanno permesso di monitorare in modo continuo e automatico lo stato di salute degli elettrodomestici per programmare interventi di manutenzione preventivi e mirati evitando così di sottoporre le macchine a eccessivi stress (Fig. 7).

In tutti questi progetti, come vediamo, il tema della massimizzazione dei Big Data e della previsione degli stessi, messo in luce dai diversi settori, risulta ancora eluso, se non a livello urbano, da gran parte della comunità scientifica nel campo del patrimonio culturale (Fig. 8).

### 1.3 Lo sviluppo delle ricerche nel campo del patrimonio culturale

#### 1.3.1 La definizione di patrimonio culturale

La tutela, la conservazione e il restauro del patrimonio culturale sono temi che hanno animato fortemente il dibattito storico-architettonico a partire dal secondo dopoguerra quando i danni bellici obbligarono, come afferma Roberto Pane<sup>9</sup>, “a rimettere in discussione i criteri stessi del restauro”.

La grande distruzione del patrimonio culturale provocata dai bombardamenti del conflitto non consentì di applicare i principi delineati nella “Carta di Atene” del 1931, nella “Carta del restauro italiano” del 1932 e nelle “Istruzioni post 1939”, promulgate dal Ministero dell'Educazione Nazionale (Casiello, 2011) e le ricostruzioni vennero quasi sempre realizzate in deroga a questi documenti internazionali. In questo particolare frangente, la cultura architettonica internazionale si interrogò sulle corrette pratiche del restauro, della salvaguardia e della conservazione dei monumenti; temi



Fig. 7 – Esempificazione grafica del concetto di Digital Twin.

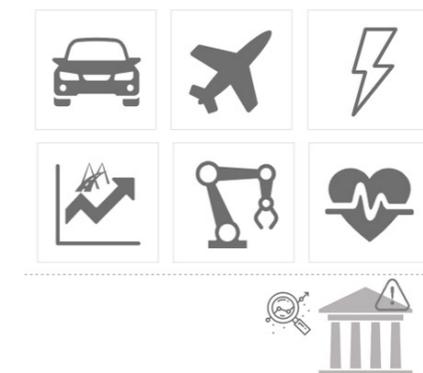


Fig. 8- Applicazione dei modelli previsionali nei diversi campi d'indagine analizzati.

che, circa vent'anni dopo la fine della guerra, portarono alla redazione, in occasione del secondo congresso internazionale degli architetti e tecnici del restauro, tenutosi a Venezia nel 1964, della “Carta di Venezia” che ancora oggi costituisce la pietra miliare per la tutela e la salvaguardia dei monumenti<sup>10</sup>. Il documento è strutturato in sedici articoli, divisi in sei sezioni, introdotti da un preambolo che riassume in maniera mirabile il tema in questione ponendo in evidenza che il patrimonio monumentale rappresenta un “*patrimonio comune*” che si trova sotto la responsabilità dell’umanità la quale ha l’onere di trasmetterlo alle future generazioni nella sua “*completa autenticità*”<sup>11</sup>. Tra i diversi articoli, all’interno del testo, si distingue in modo particolare l’articolo 1 in cui per la prima volta viene messo in discussione la concezione di patrimonio culturale, tipicamente monumentale, ampliando la salvaguardia non solo allo spazio urbano che circonda il monumento altresì a quei valori culturali e sociali, testimonianze di culture diverse.

“*La nozione di monumento storico comprende tanto la creazione architettonica isolata quanto l’ambiente urbano o paesistico che costituisca la testimonianza di una civiltà particolare, di un’evoluzione significativa o di un avvenimento storico. Questa nozione si applica non solo alle grandi opere ma anche alle opere modeste che, con il tempo, abbiano acquistato un significato culturale*” (art.1, ICOMOS, 1964).

La concezione dei monumenti come testimonianza di culture diverse ha portato, negli anni, a maturare a livello internazionale la definizione, ancor più ampia, di patrimonio culturale che fu, difatti, approvata durante la Conferenza Generale dell’UNESCO, tenutasi a Parigi nel 1972.

In questa occasione, la “Convenzione per la protezione del patrimonio mondiale, culturale e naturale di ogni nazione” ha distinto tre tipologie di beni che possono essere iscritti nella lista del Patrimonio Mondiale: monumenti, gruppi di edifici e siti. In particolare, i monumenti del patrimonio sono definiti all’articolo 1 come:

“*Opere di architettura, di scultura o di pittura monumentali, elementi o strutture di carattere archeologico, iscrizioni, grotte e gruppi di elementi che hanno un valore eccezionale dal punto di vista della storia, dell’arte o della scienza*”<sup>12</sup>.

Per quanto riguarda l’Italia, a livello normativo, già nel 1939 furono promulgate due leggi aventi per oggetto la tutela delle “cose d’interesse Artistico o Storico”<sup>13</sup> e la tutela del Paesaggio<sup>14</sup>, note come leggi Bottai. Successivamente, il concetto di patrimonio figura anche all’interno dei cosiddetti “principi fondamentali” della Costituzione italiana ove all’articolo 9 viene finito che:

“*La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione*”<sup>15</sup>.

Anche se più volte citata, l’accezione del termine “bene culturale” è entrata solo recentemente nella legislazione italiana. Tale espressione fu per la prima volta utilizzata durante la Convenzione dell’Aja nel 1954<sup>16</sup>, nella quale si definirono le categorie appartenenti ai beni culturali per la loro salvaguardia in caso di conflitto armato, e con gli atti della Commissione Franceschini del 26 aprile 1964, anche a livello nazionale, furono dichiarati come beni culturali tutti quei beni che “costituiscono testimonianza materiale avente valore di civiltà”.

Nell’epoca contemporanea, l’UNESCO<sup>17</sup> e tante altre organizzazioni internazionali, come ad esempio l’ICOMOS, promuovono costantemente la protezione e la conservazione di siti e monumenti sul territorio, attraverso i comitati scientifici internazionali, con la promulgazione di carte e raccomandazioni che sottolineano l’importanza di documentare e digitalizzare i beni culturali. Questi comitati sono composti da esperti specializzati in vari temi e questioni relative al patrimonio culturale. Tra questi esperti figura anche il prof. arch. Massimiliano Campi, relatore della ricerca tesi, oggi coordinatore scientifico del comitato ICOMOS – CIPA HD (Fig. 9).

Con l’evoluzione di sistemi tecnologicamente avanzati, la Commissione UNESCO ha promosso, nel 2003, la Carta sulla Conservazione del Patrimonio Digitale. Il documento si è concentrato sulla protezione del patrimonio, quest’ultimo inteso come insieme di “*risorse culturali, formative, scientifiche e amministrative [...] create in digitale, o convertite in forma digitale a partire da risorse analogiche già esistenti*”<sup>18</sup>.

Al contempo, sia a livello nazionale che europeo, molti progetti, tuttora in corso, hanno lo scopo di promuovere la conservazione e la tutela del patrimonio esistente in cui la digitalizzazione, monitoraggio e valorizzazione rivestono un ruolo chiave. In particolare, in linea con le tematiche emergenti nella scena contemporanea, il tema delle sfide tecnologiche insite nell’attuale fase di transizione digitale, è fortemente sostenuto nelle strategie nazionali ed europee della fase post-Covid ed affrontato anche dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ove le università e i poli di ricerca assumono un ruolo di traino nel panorama nazionale.

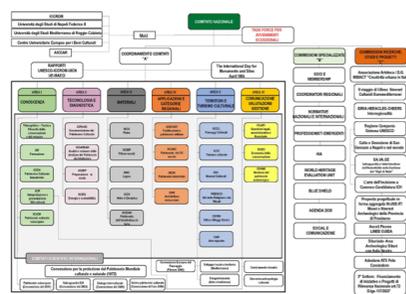


Fig. 9 – Organizzazione gerarchica del comitato ICOMOS, CIPA HD.

### 1.3.2 Dal modello digitale (numerico, informativo e parametrico) al modello previsionale: il Digital Twin per l'architettura

Le opportunità che le nuove tecnologie svolgono nel settore del patrimonio costruito sono significative. Nell'ultimo ventennio, gli sviluppi nel campo della computer vision hanno sempre più favorito negli ambienti virtuali l'uso di modelli digitali, con l'obiettivo di ottenere una vera e propria replica dell'opera reale. A partire dagli anni 2000, nel dominio dei Beni Culturali si sono cominciate, infatti, a comprendere le enormi potenzialità dei sistemi di rilevamento tridimensionale e la generazione di modelli numerici, applicati a monumenti e siti storici del patrimonio, è oggi una pratica ampiamente diffusa (Docci and Bianchini, 2016) (Fig. 10).



Fig. 10- Modello digitale della cattedrale di San Matteo a Salerno.

Oltre alle consolidate tecniche di esplorazione dei modelli alle diverse scale e da diversi punti di vista, la ricerca nel campo del patrimonio architettonico è di duplice natura: da un lato si sta orientando verso la possibilità di utilizzare i sistemi di comunicazione per conoscere l'architettura sia tangibile che intangibile; dall'altro verso la creazione di modelli informativi digitali, in cui la rappresentazione morfo-metrica del sito o del manufatto è associata a preziose informazioni eterogenee relative alla documentazione, alla conservazione o restauro del bene (Cera and Campi et, 2021; Croce et. al, 2021; Teruggi et. al, 2021). Nel primo caso ci si trova dinanzi ad un campo di azione in cui i modelli digitali si identificano come strumenti di conoscenza, di fruizione e di restituzione del costruito (Guidi et. al, 2014; Campi et al., 2017), nell'altro, invece, svolgono un ruolo di fondamentale supporto a tutti gli esperti coinvolti nello studio del patrimonio architettonico e provenienti da diversi settori disciplinari, al fine di pianificare interventi di restauro e di conservazione (Figg. 11).



Fig. 11 - Annotazione semantica del concetto "capitello" associata sul modello digitale di una colonna della chiesa monastica di San Lorenzo a Padula (SA).

Una analisi dello stato della letteratura di questo ambito d'indagine rivela l'esistenza di una ampia mole di ricerche dedicate all'analisi di tecniche per l'annotazione di informazioni eterogenee. Per raggiungere tale scopo l'approccio metodologico di questi studi, in generale, si avvale delle tecniche di segmentazione o classificazione automatica o semi-automatica che permettono di conferire uno stretto legame tra la rappresentazione tridimensionale, ottenuta dal rilievo, e quella semantica associata a informazioni complementari sul modello, coadiuvata da tecniche di Intelligenza Artificiale. Con tali approcci operativi i dati tridimensionali vengono indagati per riconoscere le aree di degrado, le componenti materiche e tipologiche di un manufatto e così via (Grilli 2020; Croce 2021). In altri approcci, invece, le annotazioni vengono georeferenziate diretta-

mente sui modelli tridimensionali come riportato dalle ricerche condotte dal Laboratorio Visual Computing dell'Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione "A. Faedo" - ISTI - del CNR o del CNRS MAP di Marsiglia (Apollonio et. al, 2018; Roussel et. al, 2019) (Figg. 12-13).

Un altro campo di sviluppo è costituito dai processi di elaborazione parametrica basata su oggetti ontologicamente riconosciuti Building Information Modeling, meglio noti con l'acronimo di BIM. La nascita del sistema BIM risale agli anni Settanta quando fu presentata da Charles Eastman ed altri autori dell'University di Pittsburgh (USA), una ricerca dal titolo "An Outline of the Building Description System" che proponeva per la prima volta la modellazione parametrica degli edifici di nuova costruzione. In specificità ai Beni Culturali, il processo a partire dal 2009 prende il nome di H-BIM (Historic Building Information Modeling). In tal caso, il termine fu utilizzato per la prima volta dal professore Maurice Murphy del Dublin Institute of Technology all'interno del testo in cui si analizzava la possibilità di applicare il processo BIM, di modellazione parametrica, al patrimonio costruito (Murphy et al., 2009). Pertanto, alla luce di ciò, il processo di modellazione parametrica HBIM associa a partire dal modello geometrico tridimensionale (acquisito con tecniche di rilievo) informazioni di vario tipo da quelle testuali a quelle tematiche, a quelle descrittive (Scandurra, 2020) (Fig. 14).

I sistemi "intelligenti", in un'epoca in cui "l'utopia dell'ubiquità si fa apparentemente reale" (Zamponi, 2015), stanno trasformando continuamente i beni culturali. Con specifico riferimento al dominio del patrimonio costruito, l'utilizzo di flussi di dati, in questa transizione digitale in cui l'architettura subisce nel tempo continue trasformazioni, ottimizza le attività legate alla conservazione e predizioni di innumerevoli mutamenti fisici cui è sottoposto il monumento; quest'ultimo è costantemente connesso con il proprio alter ego. Recentemente, la tecnologia è diventata sempre più sofisticata grazie all'industria 4.0 aprendo, dunque, la strada a nuove applicazioni, che vanno ben oltre le tradizionali applicazioni dei sensori. Infatti, se da un lato, con le metodologie reality based, è possibile ottenere la produzione di nuvole di punti e modelli tridimensionali digitali che, consentono di navigare nello spazio virtuale l'insieme e il dettaglio delle architetture, con le metodologie wireless system sensor è possibile acquisire una serie di parametri quali temperatura, umidità, vibrazioni ecc., che possono determinare lo stato di conservazione. Questi moderni sistemi di acquisizione sono costituiti dall'installazione di una rete di sensori mobili e/o fissi la cui



Fig. 12 - Segmentazione gerarchica in livelli del modello tridimensionale della Fontana di Nettuno e successiva suddivisione in sotto-componenti su ciascun livello.

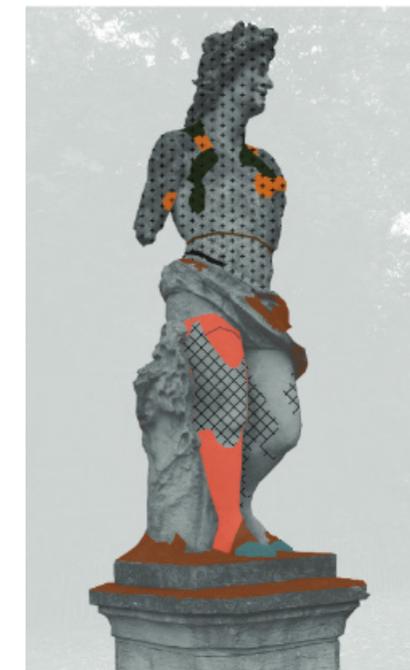


Fig. 13- Annotazione semantica sul modello tridimensionale.

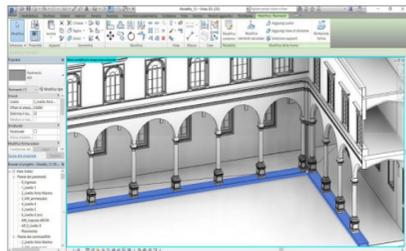


Fig. 14 – Ricostruzione H-BIM basata sul rilievo tridimensionale. Fase di elaborazione del modello H-BIM dell’Atrio dei Marmi all’interno dell’Archivio di Stato di Napoli.

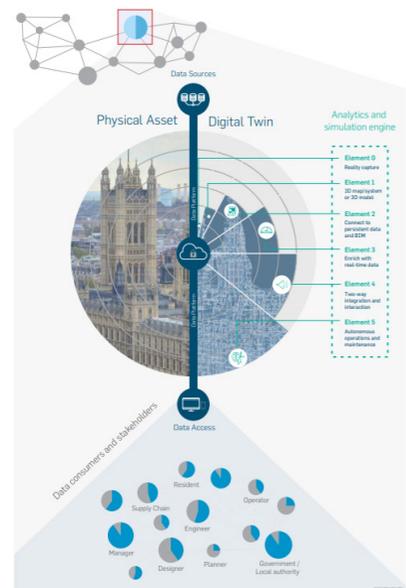


Fig. 15 – Schematizzazione del Digital Twin secondo Simon Evans.

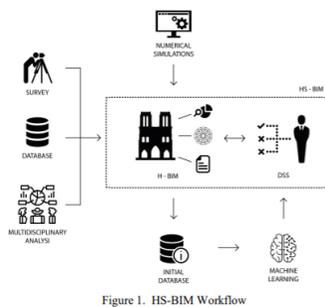


Fig. 16 – Workflow operativo HS-BIM.

scala e configurazione può variare notevolmente a seconda dell’applicazione e del caso studio da analizzare, garantendo, in tempi e costi ridotti, la produzione di dati estremamente accurati. I vantaggi sono numerosi e le notevoli informazioni acquisite possono essere successivamente elaborate in modo efficiente mediante l’applicazione di sistemi di Intelligenza Artificiale. In tale contesto, negli ultimi decenni, l’integrazione delle tecnologie reality based e wireless system sensor sono strettamente legate al concetto di Digital Twin. In particolare, nel campo architettonico, la possibilità di elaborare questo tipo di analisi inizia a svilupparsi grazie ai processi delle tecnologie di supporto nei settori dei Big Data (Madni et al., 2019; Evans, 2019). L’idea dei gemelli digitali nasce nel 2002 da quando Michael Grieves (Grieves, M. and Vickers, 2017; Grieves, 2019) ha coniato il termine all’Università del Michigan per poi svilupparsi, successivamente, anche in altri campi d’indagine. Sebbene tuttora non esista una definizione univoca del termine, il Digital Twin viene descritto come “una rappresentazione virtuale dinamica di un oggetto fisico o di un sistema lungo tutto il suo ciclo di vita, utilizzando dati temporali per consentire la comprensione, l’apprendimento e il ragionamento” (Bolton et al., 2018; p. 783). In questo contesto di applicazione, il modello dinamico è caratterizzato da algoritmi che basandosi su una serie di informazioni che arrivano dalla sensoristica emulano e quindi simulano il comportamento di un oggetto reale fornendo, al contempo, mediante database la conoscenza dei dati in tempo reale (Fei et al., 2022). Attualmente non esiste una definizione univoca del termine e i differenti concetti e metodologie dipendono fortemente dal rispettivo contesto di applicazione. Al di là della definizione, lo stato della letteratura mette in evidenza i differenti livelli. Per quanto riguarda, ad esempio, l’ambiente costruito, il concetto di Digital Twin secondo Simon Evans, è scomposto in sei livelli: Level 0 o Reality Capture (nuvola di punti, droni, fotogrammetria o disegni/schizzi); Livello 1 o modello 3D (BIM - HBIM); Livello 2 o Integrazione dati; Livello 3 o acquisizione dati in tempo reale; Dati di livello 4 o Livello di integrazione; Livello 5 o manutenzione o operazioni di predizione (Evans, 2017) (Fig. 15). Lo scopo di questa metodologia mira ad ottenere la copia virtuale dell’oggetto e sviluppare strategie conservative, manutentive e previsionali (Santagati and La Russa, 2020) (Fig. 16). Inoltre, nel campo architettonico, l’avanzamento tecnologico della sensoristica, comporta una sovrabbondanza di dati e di informazioni che si accompagnano ai manufatti reali senza alcun tipo di sistematizzazione. Tuttavia, viene richiesta una rappresentazione dei dati flessibile e facilmente accessibile. Per affrontare questo problema si propone l’uso di un database a grafi, che è un modello relativamente

nuovo per archiviare e recuperare, in modo più flessibile, dati eterogenei. Lo studio è volto alla sperimentazione di metodologie innovative che consentano mediante la gestione di dati di attuare strategie conservative.

#### 1.4 Integrazione dei Big Data

Nell’ambito dei Digital Twin la moltitudine di informazioni che caratterizza tali modelli comporta considerevoli problematiche. Set di dati, dinamici e in rapida crescita, richiedono soluzioni IT ad alte prestazioni per poter essere analizzati ed utilizzati. È necessario, pertanto, individuare un sistema di archiviazione per la gestione di risorse eterogenee, capace di essere investigato da tecniche di apprendimento informatico. Per tale motivo, si è deciso di analizzare quei database che possano supportare l’archiviazione, la gestione e la condivisione delle risorse digitali. Ad oggi, i sistemi di soluzioni digitali per il repository di informazioni digitali è dominato da due tipologie: i database relazionali e i database grafo. La scelta, per lo scopo metodologico della ricerca, è ricaduta sui database a grafo, sviluppatasi a partire dagli anni 2000. Tali sistemi sono mappati su grafici e sono composti da nodi e da bordi. Questi ultimi rappresentano le relazioni di questi oggetti tra loro<sup>19</sup>. Tra i modelli più diffusi, vi sono il labeled-property graph e il Resource Description Framework, meglio noto con l’acronimo RDF. Nel primo caso vengono attribuite determinate proprietà, note anche come properties, ai nodi e ai bordi (Fig. 17). Nel secondo modello, invece, Resource Description Framework (RDF) la modellazione delle informazioni è caratterizzata secondo delle triple o delle quadruple: le triple sono costituite da tre elementi secondo lo schema nodo-bordo-nodo. Le quadruple completano le triple con ulteriori informazioni contestuali, rendendo facile raggruppare queste ultime in gruppi (Fig. 18). Lo studio metodologico è stato svolto di concerto con l’unità di Informatica<sup>20</sup> del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell’Informazione (DIETI) dell’Università degli Studi di Napoli “Federico II” (Falcone et al., 2021).



Fig. 17 - Schematizzazione della struttura di un modello a grafo RDF.

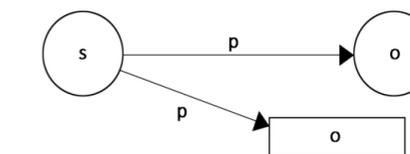


Fig. 18 - Schematizzazione della struttura di un modello a grafo RDF.

### 1.4.1 Un modello a supporto delle analisi previsionali. Neo4j: il database a grafo

Le tecnologie basate su grafici hanno dimostrato, negli ultimi anni, i loro vantaggi in diversi domini e sono state incluse nell'elenco annuale dei Top Trends in Data and Analytics di Gartner per il 2020<sup>21</sup>. I sistemi a grafo, come indica l'etimologia del termine, si compongono di una serie di nodi e relazioni e sono in grado di gestire informazioni altamente interconnesse tra loro. In particolare, Neo4j (Webber, 2012; Robinson et al., 2013) è un software per basi di dato a grafo open source che è sviluppato in linguaggio Java nel 2003 dal lavoro di un gruppo di ingegneri svedesi<sup>22</sup>, e applicato a un numero elevato di scenari relativi alla rappresentazione (Dietze et al., 2016), all'esplorazione (Drakopouloset.al., 2015) e visualizzazione (Jimenez et al., 2016) di dati. Il modello Neo4j, detto anche Property Graph, è caratterizzato da un'elevata scalabilità, facilità d'uso e dal suo linguaggio di query proprietario, Cypher che è stato progettato per essere un linguaggio di query molto semplice che evidenzia la struttura dei pattern utilizzando una sintassi ASCII-art ispirata a SQL. Nell'ambito delle attività di cross-reference dei dati, Neo4j viene utilizzato come parte di un sistema di raccomandazione sociale basato sulle reti di amici di Facebook e sui dati provenienti da DBPedia ed Europeana (Sansonet et al., 2019). Infatti, le reti complesse, in generale, possono essere rappresentate in una struttura chiara e facilmente accessibile, come nel caso dei social network (Fig. 19). Le rappresentazioni basate su database a grafo non sono vincolate da schemi statici; pertanto, è possibile aggiungere sia le etichette che i nodi ed i tipi di relazione senza interrompere il database, ricordando che una struttura a grafo si basa su: i) nodi: rappresentano i record/dati. È possibile aggiungere zero o più etichette a un nodo; ii) relazioni: rappresentano la connessione tra i nodi. Ogni connessione ha sempre una direzione; iii) proprietà: rappresentano i valori dei dati nominati e possono essere associate sia ai nodi che alle relazioni. Ai fini della ricerca, Neo4j potrebbe essere utilizzato come strumento chiave per consentire una rappresentazione più efficace dei Digital Twin, gestendo i dati provenienti da diversi sensori. Questi sono interconnessi tramite strutture grafiche intermedie che preservano le rappresentazioni dei dati della specifica sorgente.

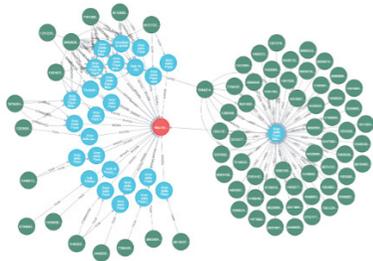


Fig. 19 - Esempio di rappresentazione grafica dell'attività social estratta da Flickr rispetto all'oggetto Wikidata che rappresenta l'Arco della Pace.

### 1.4.2 Gestione dei modelli previsionali

In architettura, il monitoraggio dei dati ai fini delle analisi previsionali pone una serie di problemi in termini di infrastrutture necessarie a raccogliere, organizzare e rendere disponibili dati acquisiti con diverse frequenze di campionamento e diversi tipi di informazioni. I principali problemi derivanti dalla visione di una grande infrastruttura per raccogliere, organizzare, archiviare e fornire dati sugli edifici monitorati si riscontrano in tutte le diverse fasi del processo. Per quanto concerne la fase di raccolta, sebbene la frequenza di campionamento non sia, generalmente, elevata per i sensori di monitoraggio, un solo edificio può contenere più sensori dedicati alla raccolta di informazioni diverse. Inoltre, i locali di grandi dimensioni necessitano di più sensori costantemente attivi. Con l'aumentare del numero di edifici da monitorare, il flusso di traffico può diventare oneroso da gestire. Inoltre, i dati grezzi raccolti possono richiedere diversi tipi di elaborazione per estrarre informazioni significative dal flusso di base fornito dai sensori. Le istanze del processore di dati possono analizzare il flusso di dati fornito da più sensori ed estrarre eventi significativi da archiviare in un repository condiviso per riferimento futuro. Sia i dati grezzi che le informazioni elaborate devono essere archiviati per il recupero e l'analisi future. Pertanto, dovrebbero essere adottate soluzioni specifiche per il recupero di serie temporali in riferimento ai tipi di eventi, di edifici monitorati e di disponibilità di sensori per supportare adeguatamente gli attori che entrano o escono dal processo. Questo scenario, riassunto nella figura 20, è caratterizzato da una quantità significativa di diversi attori che possono, in qualsiasi momento, connettersi all'infrastruttura o scomparire per malfunzionamento o per tante altre cause. La robustezza dell'infrastruttura proposta va quindi valutata in termini di capacità di sostenere un traffico intenso dovuto al passaggio di messaggi, di far fronte all'imprevedibilità

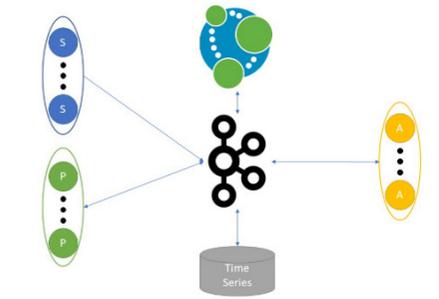
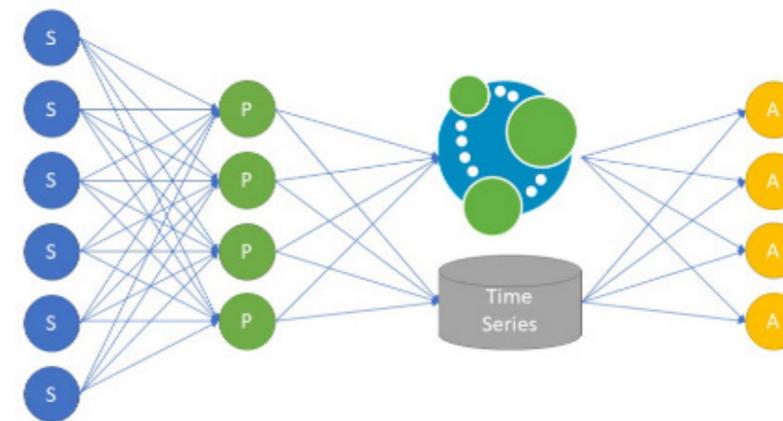


Fig. 21 - Architettura basata su Kafka per la gestione del passaggio/streaming dei messaggi.

Fig. 20 - Schema di comunicazione tra gli attori coinvolti nel passaggio dei dati: (S) sensori, (P) processori e (A) analizzatori con Neo4j e un database specializzato di Time Series.

della disponibilità degli attori nonché alle caratteristiche flessibili di archiviazione. Per far fronte ai problemi presentati, la linea metodologica della ricerca prevede l'uso dell'infrastruttura di streaming dei messaggi Apache Kafka<sup>23</sup>, una piattaforma di streaming open source, per gestire la comunicazione tra gli attori coinvolti, che possono essere aggiunti o rimossi dall'infrastruttura in qualsiasi momento senza avere un impatto sul resto degli attori come riportato in figura 21. Per tenere traccia dei fornitori di servizi disponibili e per memorizzare i dati prodotti dagli attori del trattamento dei dati viene utilizzata una struttura a grafo. In questo modo, i nuovi attori possono interrogare il database per ottenere le informazioni necessarie per connettersi ai fornitori di dati in Kafka e, allo stesso tempo, possono utilizzarlo per archiviare/recuperare le informazioni necessarie al loro funzionamento. Il database stesso può pubblicare informazioni rilevanti relative agli aggiornamenti della struttura del grafico, in modo che gli attori, in base alle ultime informazioni disponibili, possano reagire a tali eventi. In sintesi, l'oneroso lavoro di trasmissione dei messaggi deve essere gestito da Apache Kafka, ove le informazioni elaborate riguardanti sia gli eventi rilevati che lo stato dell'infrastruttura vengono archiviate in Neo4j mentre le serie temporali grezze vengono archiviate in un database dedicato. Per supportare i nuovi attori nel processo di ricerca di fonti di dati che siano di interesse per il loro compito specifico e tenere traccia delle relazioni tra gli attori coinvolti nel presente framework, può essere utilizzato, congiuntamente, anche il database Neo4j. Questo può andare oltre gli attori virtuali come elaboratori/analizzatori di dati e deve includere attori fisici, come edifici e ambienti. Nell'ambientazione, ogni attore, fisico o virtuale, è rappresentato da un nodo, legato ad attori rilevanti da relazioni orientate. In questo modo è possibile rappresentare in modo esplicito la struttura del sistema in un dato istante, consentendo ragionamenti complessi sia sui dati raccolti che sulla tipologia degli attori dell'elaborazione dei dati. La figura 22 mostra gli attori attualmente previsti e le loro relazioni rappresentate in Neo4j; i nodi rappresentano entrambi gli attori fisici, come gli edifici, ambienti di cui sono composti e sensori situati in tali ambienti. I sensori pubblicano flussi di dati sugli argomenti di Kafka, in modo che i nuovi processori possano iscriversi all'argomento a cui sono interessati interrogando il database a grafo Neo4j. Il database stesso tiene traccia dei processori che ricevono dati dai sensori. In tal modo, i processori creano eventi nel set di dati e forniscono il loro output sui nodi Kafka, essendo aggiornati quando vengono segnalati eventi complessi dai nodi del processore. Tale struttura può informare l'intero sistema sul suo stato, la sua evoluzione dinamica e può essere utilizzata per supportare il

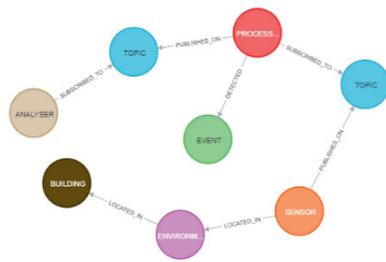


Fig. 22 - Rappresentazione, in Neo4j, degli attori coinvolti e delle loro relazioni.

ragionamento combinando sia informazioni strutturali che flussi di dati continui.

## Note

- 1 - Il decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, meglio noto come Codice dei beni culturali e del paesaggio o Codice Urbani, è un decreto legislativo, composto da 184 articoli, che regola la tutela dei beni culturali e paesaggistici d'Italia. L'art. 2 del Codice suddivide il patrimonio culturale in beni culturali, la cui definizione è contenuta negli artt. 10 e 11, ed i beni paesaggistici disciplinati, invece, nella terza parte del Codice a partire dall'art. 131.
- 2 - <https://www.linkiesta.it/2021/08/clima-beni-culturali-inquinamento/>
- 3 - <https://trid.trb.org/view/754603>.
- 4 - (<https://www.fosterandpartners.com/projects/trafalgar-square/>).
- 5 - Lo studio Space Syntax fornisce competenze creative in architettura e pianificazione urbana. Operando in tutto il mondo, gestiscono l'esperienza di progettazione globale con tecnologie digitali avanzate. Gli strumenti di modellazione prevedono gli impatti sociali, economici e ambientali dello sviluppo su mobilità, valore del terreno e salute. <https://spacesyntax.com/>. Questo filone di ricerca è stato approfondito dall'arch. Giacomo Santoro nell'ambito della tesi di Laurea Magistrale in Architettura dal titolo "Il rilievo urbano come strumento per una progettazione data driven". Relatore prof. arch. Massimiliano Campi, correlatore arch. Marika Falcone. Successivamente il lavoro è stato presentato nell'ambito del convegno REAACH-ID 2022 (coordinatori scientifici: prof. Roberta Spallone, prof. Andrea Giordano e prof. Michele Russo).
- 6 - L'organizzazione Mondiale della Sanità – World Health Organization (WHO), fu istituita nel 1948 ed è specializzata per le questioni sanitarie, e ad oggi vi aderiscono 194 Stati. La missione della WHO è quella di promuovere la salute, di mantenere il mondo sicuro a livello sanitario e di dare assistenza ai più deboli, con un impatto misurabile sulla popolazione di ogni singolo paese.
- 7-<https://www.agendadigitale.eu/sanita/big-data-interoperabilita-e-condivisio-ne-dei-dati-sono-priorita-per-la-ricerca-medica/>.
- 8- Il marchio Candy nasce nel 1945 con la produzione della prima lavabiancheria italiana. Negli anni, il Gruppo Candy mediante una serie di acquisizioni sul territorio italiano e all'estero, ha progressivamente rafforzato la propria presenza commerciale ed industriale nel mondo confermandosi oggi uno dei principali player del mercato.
- 9- L'esigenza di tutelare i monumenti dalle distruzioni trova i suoi primi interpreti alla fine del XVIII secolo, William Morris e John Ruskin che ebbero un'enorme influenza sulla disciplina del restauro. Nel secolo seguente, dopo anni di lunghi dibattiti, per garantire la conservazione dei beni culturali si giunge, in occasione di più congressi a cui parteciparono architetti e ingegneri, ad enunciare dei principi e delle linee guida che portarono all'elaborazione delle carte di Atene (1931) e carta italiana del restauro (1932). Nella prima carta, composta da dieci punti, furono delineate delle raccomandazioni secondo le quali ogni Stato doveva proteggere il patrimonio architettonico, far prevalere

l'interesse pubblico a quello privato e di ampliare lo studio dell'arte così da trasmettere alla popolazione e alle generazioni future il rispetto per il patrimonio. L'anno successivo, durante il congresso Superiore per le Antichità e le Belle Arti presso il Ministero della Pubblica Istruzione, invece, fu emanata la prima carta del restauro italiano. In essa si affermavano i principi analoghi a quelli espressi nella carta di Atene ma con in più le teorie sul "restauro scientifico" espresse in quegli anni da Gustavo Giovannoni (1873-1947).

10- La carta di Venezia, redatta nel 1964, si compone di sedici articoli, privi di valenza giuridica, in cui è sottolineata l'importanza dell'aspetto storico di un edificio e per la prima volta viene introdotto il concetto di conservazione anche all'ambiente urbano che circonda il monumento (dal verbo latino moneo, ricordo). Alla stesura di questa carta, un contributo determinante fu dato dagli studiosi italiani Roberto Pane (1897-1987), Piero Gazzola (1908-1979) e Cesare Brandi (1906-1988).

11 - [https://www.charta-von-venedig.de/conservazione-restauro\\_modello-strategico.html](https://www.charta-von-venedig.de/conservazione-restauro_modello-strategico.html).

12 - <https://www.unesco.beniculturali.it/la-convenzione-sul-patrimonio-mondiale/>.

13 - Legge n° 1089/1939 in materia di Tutela delle cose d'interesse Artistico o Storico.

14 - Legge n° 1497/1939 in materia di Protezione delle bellezze naturali.

15 - <https://www.senato.it/istituzione/la-costituzione>.

16 - Le indicazioni fornite dalla convenzione vennero integrate da due successivi protocolli, il primo del 1954 e il secondo del 1999. I tre accordi sono parte del diritto internazionale umanitario affiancandosi alle normative sulla tutela delle persone civili durante i conflitti. Nella convenzione e nei due successivi protocolli, oltre alla tutela dei beni culturali durante un conflitto armato, vengono fornite indicazioni sulla messa in sicurezza degli stessi in tempo di pace.

17 - L'organizzazione UNESCO - Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura, fu istituita a Parigi il 4 novembre del 1946.

18 - <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000179529>.

19- <https://www.ionos.it/digitalguide/hosting/tecniche-hosting/database-a-grafo/>.

20- Nello specifico, il lavoro è stato presentato nell'ambito del convegno XXIV ISPRS Congress (2021 digital edition). Si ringraziano, congiuntamente, per la ricerca condotta in ambito informatico il prof. Sergio Di Martino e il dott. Ph.D. Antonio Origlia del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Tecnologie dell'Informazione dell'ateneo "Federico II" di Napoli.

21- <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-trends-in-data-and-analytics-for-2020>.

22 - È stato sviluppato dalla Neo Technology, una startup di Malmö in Svezia e della San Francisco Bay Area.

23 - <https://kafka.apache.org/>.

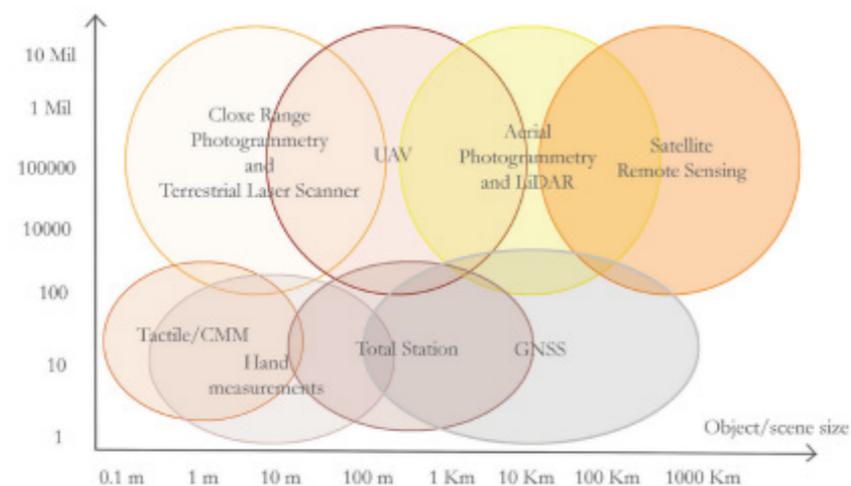
**PARTE SECONDA**  
**Dal Rilievo al monitoraggio continuo dell'architettura**

### 2.1 La digitalizzazione tridimensionale del patrimonio architettonico mediante rilievi reality-based: sistemi image-base e range-based

Negli ultimi decenni la rappresentazione del patrimonio culturale mediante l'elaborazione di modelli digitali tridimensionali è divenuta una procedura nota e riconosciuta dalla comunità scientifica. Il progresso tecnologico delle moderne strumentazioni impiegate nel rilievo dei Beni Culturali ha influito fortemente in questo campo d'indagine trasformando tecniche e metodologie di acquisizione, elaborazione e gestione dei dati. L'introduzione di tali tecnologie, infatti, ha segnato l'inizio di nuovi orizzonti scientifici, coinvolgendo i settori più diversi (da quello industriale a quello architettonico, navale, medicale...) e animando, al contempo, le più importanti sfide nelle discipline del Rilievo e della Rappresentazione. In modo particolare, negli ultimi trent'anni, si sono diffusi e perfezionati sistemi di acquisizione che si basano sull'impiego di sensori *no-contact*. Si tratta di strumentazioni, largamente utilizzate nell'ambito del *Cultural Heritage*, che consentono di generare l'immagine tridimensionale della scena che viene inquadrata mediante un modello puntiforme. Poiché restituiscono la realtà come si presenta al momento del rilievo, queste tecniche sono anche note come metodologie di rilievo reality-based (Russo et al., 2011).

I sistemi più diffusi si avvalgono dell'utilizzo di sensori che possono essere,

Fig. 23 - Tecniche della Geomatica per l'acquisizione tridimensionale di dati, rappresentate in base alla dimensione della scena/oggetto ed alla complessità del modello digitale ricostruito.



a loro volta, codificati in base alla radiazione luminosa da essi utilizzata. Si definiscono così sensori ottici attivi o range-based, quelle strumentazioni che utilizzano luce strutturata (laser scanner, stazione totali, radar, LiDAR) e sensori ottici passivi o image-based, quei sistemi che sfruttano la luce naturale (tecnica fotogrammetrica, teodoliti, tacheometri...) (Remondino and Rizzi, 2010) (Fig. 23). La scelta sul tipo di strumentazione e metodologia da adottare è funzione, invece, di diversi fattori che dipendono in parte dalle caratteristiche relative all'oggetto da rilevare in parte dalle finalità del rilievo (Brusaporci, 2013; Weinmann, 2016).

In questa cornice, si inseriscono tutta una serie di studi che, con un approccio metodologico integrato, multi-scalare e multi-risoluzione, analizzano le capacità intrinseche (precisione, accuratezza, forma, velocità di acquisizione, dimensione e posizione dell'oggetto) e i processi algoritmici delle possibili modalità di integrazione tra dati ottenuti da sensori e procedure differenti. In particolare, gli sviluppi digitali relativi a tali tecnologie consentono di intravedere nuove possibilità di impiego nell'ambito delle attività diagnostiche<sup>1</sup> finalizzate alla programmazione di interventi di restauro e manutenzione per una conservazione predittiva. La molteplicità dei temi che investono, oggi, il campo della conservazione richiede lo sviluppo di metodologie di indagine sempre più avanzate con la sperimentazione di nuove soluzioni per rilievi rapid mapping (Sammartano, 2016; Nocerino et al., 2017; Calantropio et al., 2018; Russo et al., 2019) e il monitoraggio continuo delle architetture coadiuvato da applicazioni di Intelligenza Artificiale. Questo importante traguardo cambia radicalmente l'approccio al tema della conservazione delle architetture introducendo così la diffusione

e la costruzione di modelli predittivi. In quest'ottica, le informazioni metriche e colorimetriche del modello digitale fungono da impalcatura per la realizzazione di modelli previsionali legati al monitoraggio dei fenomeni di alterazione e degradazione superficiale. Il rapporto che si instaura tra queste due realtà, rilievo e Intelligenza Artificiale apre nuovi scenari operativi. In tale contesto il campo di indagine delimitato coinvolge diverse questioni teoriche e metodologiche e alla luce dei problemi sopracitati, sorgono due principali questioni. La prima consiste nel correlare, in una procedura automatizzata, una moltitudine di dati provenienti da sensori eterogenei. Ad oggi, infatti, le tradizionali rappresentazioni digitali di tali manufatti si occupano prevalentemente di informazioni geometriche e colorimetriche, senza fornire alcun sistema di monitoraggio del patrimonio costruito. Se, quindi, da un lato, la rappresentazione digitale di un'architettura non è esaustiva dall'altro, il modello tridimensionale diviene il tramite, mediante applicazioni di Intelligenza Artificiale, per accedere alle diverse informazioni eterogenee che divengono il punto di partenza per le analisi previsionali. D'altra parte, nuove soluzioni, basate su rappresentazioni di modelli digitali, pur consentendo di sviluppare strategie di conservazione più efficaci, richiedono, ancora una volta, di affrontare sfide significative sia per l'acquisizione e gestione dei dati, che richiedono tempi e procedure speditive, sia per il modo di rappresentare le relazioni tra flussi provenienti da sensori differenti e l'elaborazione di metodi di analisi (Falcone et al., 2021). L'obiettivo è quello di tradurre i dati grezzi in analisi previsionali utili al monitoraggio di fenomeni di degrado che il patrimonio architettonico, con particolare attenzione ai Beni Culturali, subisce nel corso del tempo. Pertanto, partendo da tali premesse, per ottimizzare il processo di indagine diagnostica propedeutica al progetto di restauro dei manufatti architettonici, nei paragrafi successivi, vengono analizzate le strumentazioni tecnologiche no-contact che meglio rispondono, in termini di accuratezza e velocità, al rilievo di tipo previsionale.

## 2.2 - Sistemi range-based. Dai sistemi Laser scanning ai Sistemi Mobile Mapping LiDAR e SLAM: principi teorici, strumentazioni e tecniche di acquisizione ed elaborazione dei dati.

Le tecniche range-based, o sistemi ottici "attivi" (Guidi et al., 2010), appartengono alla grande categoria dei sistemi di acquisizione no-contact che

basano il loro utilizzo sulla radiazione luminosa. A differenza dei sistemi passivi che si avvalgono della luce naturale, il funzionamento di questa tecnologia è affidato ad un sensore elettronico in grado di riconoscere luce codificata. Queste tecniche, impiegate nel rilevamento, consentono di acquisire, in forma digitale, informazioni tridimensionali relative alle distanze e misure di oggetti, descrivendoli attraverso una nuvola di punti. L'obiettivo è quello di rilevare la superficie dell'oggetto, la cui proiezione viene tradotta sul supporto di registrazione con un'immagine 3D o mappa di profondità, detta range map, avente in ciascun pixel le coordinate spaziali (x,y,z) arricchite, eventualmente, di informazioni RGB e valori di riflettanza<sup>2</sup>.

I dispositivi che utilizzano tali tecniche sono definiti range camera e, tra questi, i più diffusi sono gli scanner 3D basati su luce laser. In base al principio di funzionamento e in relazione alle dimensioni dell'oggetto da rilevare ed alla distanza tra il sensore e l'oggetto, le tecniche a sensore attivo si suddividono in due grandi famiglie:

- sistemi basati sulla triangolazione;
- sistemi basati sulla misurazione (Modulazione di fase o *Time of Flight* - TOF);

Si tratta di due concetti operativi, che differiscono per alcuni aspetti relativi al trattamento dei dati ricevuti e alle caratteristiche dimensionali dell'oggetto. In particolare, per oggetti di piccole dimensioni e volumi generalmente inferiori al metro cubo vengono utilizzati i sistemi a triangolazione, mentre per oggetti di dimensioni superiori è necessario ricorrere ai sistemi basati sulla misurazione. Inoltre, tra i sensori attivi vanno anche ricordati i radar (strumenti montati su piattaforme aeree o terrestri, che acquisiscono immagini e consentono di rilevare informazioni 3D attraverso processi di interferometria), il GPS e le stazioni totali (strumenti in grado di restituire puntualmente coordinate e posizioni nello spazio). Nel dettaglio, nei sistemi basati sulla triangolazione il principio attraverso il quale vengono misurate le coordinate di un punto è analogo al metodo classico di triangolazione impiegato in topografia (Fig. 24). Nella maggior parte dei casi, tali dispositivi sono costituiti da un emettitore di onde luminose e da uno o più sensori passivi (CCD o CMOS) posti ad una distanza nota definita "base". In questi sistemi, un insieme di componenti meccaniche e specchi consentono alla lama di luce di essere emessa in direzione dell'oggetto da rilevare e successivamente di essere acquisita, dopo la riflessione sulla superficie dello stesso, da un sensore che permette di registrare

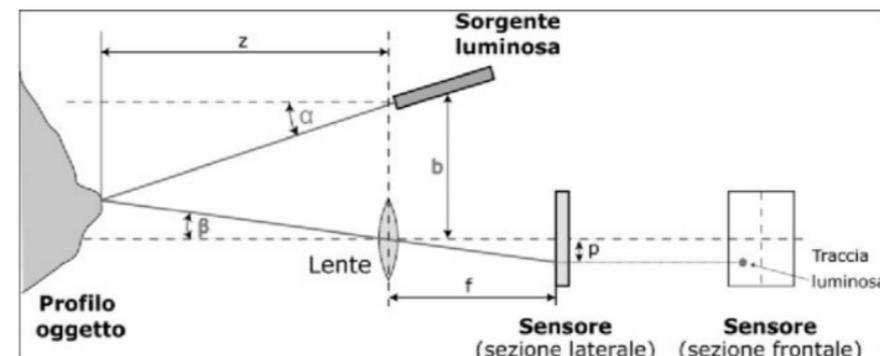


Fig. 24 - Schema di funzionamento di uno scanner tridimensionale a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser.

il raggio di ritorno e misurare l'angolo che esso forma con la base. In tal modo, noti gli angoli alla base e nota la distanza tra i due sensori, è possibile rilevare l'oggetto. Questi tipi di strumentazioni hanno un'operatività legata a brevi distanze ma sono in grado di ottenere una maggior precisione (nell'ordine delle poche decine di micron) e tempi di scansione molto bassi. Per questi motivi, vengono spesso impiegati per la realizzazione di modelli digitali di statue e manufatti presenti all'interno di poli museali<sup>3</sup>. Una differenziazione dei sensori che si basano su tale principio, sono classificabili in: (i) sensori a singolo spot laser; (ii) sensori a lama di luce laser; (iii) sensori a lama di luce laser in movimento; (iv) sensori con proiezione di pattern. Il criterio di classificazione è legato alla tipologia di luce strutturata che investe l'oggetto tridimensionale. In tal caso sono distinguibili: (i) singolo fascio di luce che produce un puntino luminoso sull'oggetto; (ii) insieme di punti che compongono un segmento; (iii) pattern come cerchi in bianco e nero, strisce verticali colorate, griglie rettangolari; (iv) alla modalità di emissione (statica o in movimento) (Figg. 25-26).

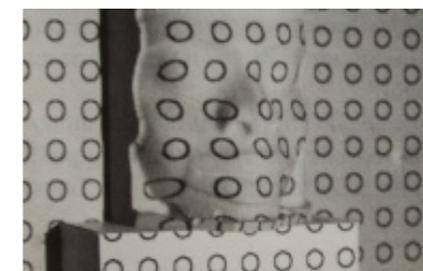


Fig. 25 - Sistema di misurazione tridimensionale tramite proiezione di pattern (cerchi).

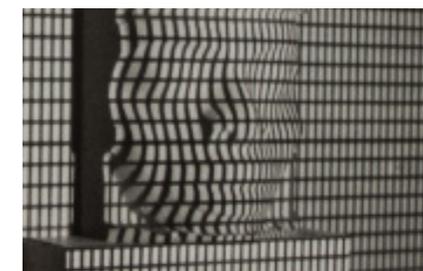
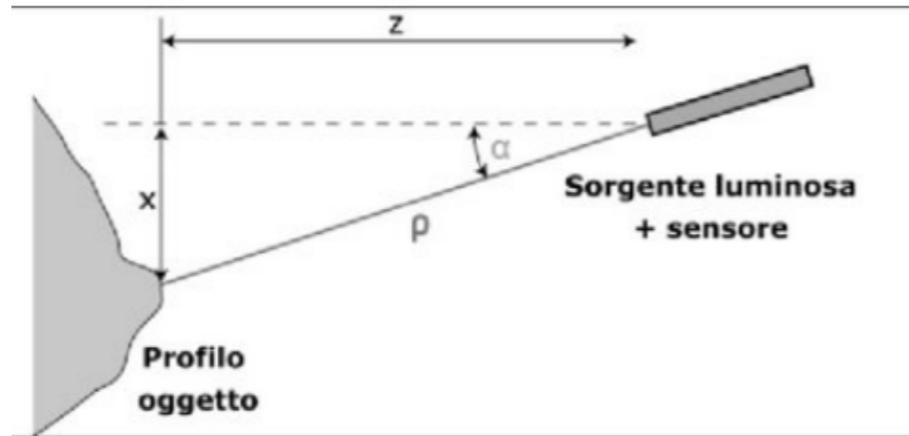


Fig. 26 - Sistema di misurazione tridimensionale tramite proiezione di pattern (griglia rettangolare).

A differenza dei sistemi a triangolazione, i dispositivi basati sulla misura di distanza sono i Laser Radar<sup>4</sup> o LiDAR (Light Detection and Ranging). Questi sistemi permettono l'acquisizione di oggetti di dimensioni maggiori in funzione della procedura di misurazione del tempo di andata e ritorno del segnale luminoso, definita "*Time of Flight* - ToF - Tempo di volo" (di Lugo et al., 2019) (Fig. 27). Conoscendo la funzione tempo è possibile determinare il valore della distanza e degli angoli tra il sensore ed i punti della superficie da acquisire che si traducono in coordinate tridimensionali. La notevole riduzione dei tempi di acquisizione, dovuta alla velocità della luce comporta, però, un aumento dell'incertezza della stima, pari, solitamente, ai 2 mm. I dispositivi attualmente in commercio si differenziano per la tecnica di misurazione e la stima delle coordinate dei punti può avvenire mediante due procedimenti fondamentali:

Fig. 27- Schema di funzionamento di uno scanner a tempo di volo (TOF).



- Misura diretta del tempo di volo;
- Misura indiretta offerta dalla modulazione dell'intensità luminosa e dagli sfasamenti di segnale;

I sistemi che impiegano la tipologia di misurazione diretta a tempo di volo emettono un impulso luminoso, - *Pulsed Wave* – PW<sup>5</sup>, a una frequenza pari a una decina di kHz, che dopo aver colpito il punto da rilevare, torna allo strumento stesso. La misura del tempo (e dunque della distanza) avviene, in questo caso, considerando le frazioni di secondo che intercorrono tra il momento di emissione del segnale e quello della sua ricezione da parte del ricevitore.

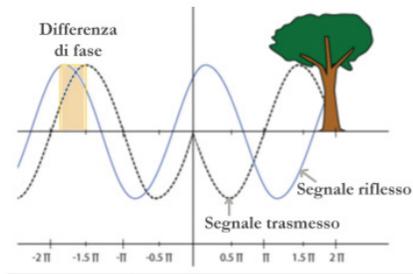


Fig. 28- Schema di funzionamento di una strumentazione a Modulazione di Fase per l'acquisizione dei dati.

La distanza risulterà quindi pari a:

$$r = \text{T.O.F} \cdot c / 2$$

Ove:

- $r$  è la distanza effettiva che sussiste tra il sensore e la superficie da acquisire;
- **T.O.F.** è il tempo di andata e ritorno del segnale luminoso
- $c$  è la velocità della luce (pari a  $3 \times 10^8$ )

Invece, il funzionamento delle strumentazioni, che impiegano il sistema di misurazione indiretta a modulazione di fase, è simile a quello a tempo di volo anche se il pattern luminoso non è più un raggio bensì una radiazione continua sinusoidale a frequenza nota, detta *Continuous Wave* (CW)(Fig. 28). In termini pratici, l'approccio operativo è analogo a quello precedente ma la distanza, in codesto caso, è calcolata misurando lo sfasamento, e quindi la differenza di fase, tra l'onda emessa e quella riflessa.

Al di là delle caratteristiche strumentali, la scelta tra un sistema e l'altra è influenzata principalmente dagli obiettivi e dall'utilizzo finale del rilievo ricordando di tener conto i tre fattori fondamentali: accuratezza, precisione e risoluzione<sup>6</sup>. Oltre alla finalità del rilievo, è sempre importante ricordare gli elementi che fortemente influiscono sulla scelta delle procedure e delle tecniche da utilizzare: la geometria, le dimensioni ed i materiali che caratterizzano l'oggetto da acquisire.



Fig. 29 – Esempio di target sferico.

Nel caso di acquisizioni con uno scanner a triangolazione è richiesta una buona sovrapposizione tra le range maps contigue (almeno 30-40%). Con strumentazioni a Tempo di Volo è, in genere, richiesto un numero inferiore di scansioni ed una minore sovrapposizione, potendo usufruire anche di targets<sup>7</sup> esterni per l'orientamento delle singole prese rispetto a punti noti (Figg. 29-30).

Un'ulteriore classificazione dipende dalla modalità di acquisizione statica o dinamica:

- procedure di statica;
- procedure di tipo dinamica;

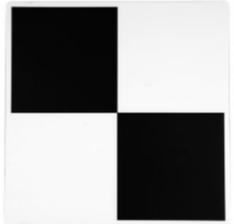


Fig. 30 - Esempio di target piano.

Nel caso di acquisizioni con sensori da postazioni statiche (Fig. 31), il processo si caratterizza per la registrazione di singole range maps, la cui programmazione è molto importante al fine di eludere il più possibile zone d'ombra. Impostati i parametri che definiscono la qualità del dato (in generale la risoluzione, il numero di punti e la velocità di registrazione), per ogni postazione sono acquisite le coordinate polari dei punti in cui l'oggetto è discretizzato e trasformate in coordinate cartesiane (x, y, z), in un sistema di riferimento il cui centro è definito proprio dallo strumento in stazione. Nella fase di processamento del dato, delle trasformazioni spaziali consentono di ricostruire la posizione dei punti nello spazio, rispetto al sistema di riferimento adottato. La trasformazione è una roto-traslazione rigida a sei parametri, dove la traslazione indica il vettore spostamento dell'origine del sistema di riferimento e la rotazione determina i tre angoli di rotazione attorno ai tre assi. Nei rilievi terrestri, il calcolo di questi sei parametri avviene ai minimi quadrati sulla base di un certo numero di punti corrispondenti. La precisione della trasformazione viene valutata calcolando lo scarto quadratico medio - RMSE Root Mean Square Error - dei residui rispetto agli n punti corrispondenti.



Fig. 31 – Scanner con acquisizione statica.



Fig. 32- Esempio di strumentazione MMS con carrello: TIMMS - Trimble Indoor Mobile Mapping Solutions, Trimble.



Fig. 33- Esempio di strumentazione MMS con zaino: Pegasus Backpack, Leica.

Nei sistemi di acquisizione dinamica, meglio noti come i sistemi di mappatura dinamica (*Mobile Mapping System*), la registrazione del dato avviene in modalità dinamica (Chiabrando et. al, 2018; Tucci et. al, 2018; Maset et al., 2022). Le principali componenti hardware sono i sensori ottici, i sensori di navigazione e posizionamento ed un'unità di controllo e sincronizzazione. I sistemi più recenti utilizzano la tecnologia LiDAR, da cui il nome Mobile LiDAR System, e sono implementati di sensori sempre più sofisticati, capaci di rilevare la ricostruzione tridimensionale dello spazio architettonico anche in ambiente indoor, con elevati livelli di precisione e in tempi notevolmente ridotti. In alcuni di questi, come il *Trimble Indoor Mobile Mapping Solutions* – TIMMS, il iMS3D della *Viametris*, il *Leica ProScan* o il *NavVis M6*, le diverse componenti sono posizionate su carrelli (Fig. 32) che rendono, quasi sempre, le fasi di acquisizione molto complesse in caso di spazi angusti e/o in presenza di scale. Altri, invece, sfruttano il posizionamento delle diverse parti su zaini (Fig. 33) o supporti a mano come aste (Fig. 34), rendendo sicuramente più agevole la fase di registrazione dati in situ. Tra questi ricordiamo il *Leica Pegasus*, lo *Zeb1* e *Zeb- Revo* della Geoslam, e i sistemi *H120SLAM* e *x120GO* della *Stonex*. Attualmente, il sistema tra i più innovativi è quello che integra tutte le componenti in un esoscheletro indossabile (Fig. 35), dal peso di circa 9kg, e facile da trasportare: *NavVis VLX* della *NavVis*, start-up tedesca<sup>8</sup> (Campi et al., 2022).

In generale, tali sistemi calcolano la traiettoria percorsa dall'operatore registrando in itinere la nuvola di punti. Anche in questo caso, il dato rilevato è di per sé grezzo e descritto da una serie di punti (a densità e risoluzione variabile in base ai parametri di acquisizione ed alla strumentazione utilizzata) che discretizzano la superficie dell'oggetto, con eventuali caratteristiche colorimetriche.

### 2.3 - Il ruolo della fotografia in architettura

Nell'ambito del Patrimonio Culturale, la fotografia ha sempre giocato un ruolo fondamentale sin dagli albori della sua invenzione risalenti alla prima metà del XIX secolo. Era l'estate del 1826 quando Joseph Nicéphore Niépce<sup>9</sup>, dopo lunghi anni di esperimenti, fu in grado di scattare ed ottenere la prima immagine con una camera oscura, un dispositivo ottico in grado di riprodurre una versione semplificata ma attendibile della realtà. L'immagine, incisa su una piastra di stagno dalle dimensioni di 20,3x25,4 centimetri, fu ottenuta con un'esposizione che durò ben otto ore; tem-

po che permise alla luce di produrre il suo effetto ovvero quello di indurire il bitume di Giudea, materiale sensibile alla luce e spalmato sulla lastra, determinando il chiaroscuro del soggetto: il panorama visibile dalla finestra del suo studio a Gras, nei pressi di Parigi (Fig. 36). In realtà, il risultato ottenuto da Niépce, era frutto di un lungo processo, avviato molti secoli prima, basato sui principi e sui metodi della geometria e della prospettiva sviluppati a partire dal Rinascimento da Filippo Brunelleschi, Leon Battista Alberti, Leonardo Da Vinci e Piero della Francesca. Quest'immagine segnò l'inizio di una nuova arte, la fotografia (dal greco antico, *phōs* e *graphè*, ossia "scrittura della luce", "disegno della luce"), la cui invenzione si fa convenzionalmente risalire al 1839, quando il nuovo procedimento fu presentato ufficialmente ai parigini presso l'Accademia delle Scienze di Parigi. Ben presto, la fotografia investì anche il mondo dell'architettura, poiché era evidente che il nuovo mezzo, strumento di sempre più precisa rappresentazione della realtà, offriva una molteplicità di applicazioni. Sin da questo periodo pionieristico, la fotografia non solo si è rivelata un prezioso mezzo utile alla documentazione, alla conservazione e alla valorizzazione del patrimonio architettonico, ma anche un insostituibile strumento ausiliario nelle operazioni di rilievo al fine di registrare in situ "le tracce del reale" (Docci and Maestri, 2020) e condurre una serie di analisi materiche e morfologiche degli elementi che compongono l'oggetto architettonico (De Luca, 2011).

### 2.4 - Sistemi image-based. La fotogrammetria. Fondamenti teorici e definizioni

La straordinaria evoluzione dell'informatica, dell'elettronica e della Computer Vision degli ultimi decenni del XXI secolo ha permesso oggi, a distanza di quasi 200 anni da quelle prime sperimentazioni di Niépce, una totale accessibilità a tecniche, strumentazione e sistemi di elaborazione dati sempre più performanti che si avvalgono sia di principi teorici legati alla storia della geometria descrittiva che di principi pratici legati alla storia dell'ottica e della fotografia. La tecnica fotogrammetrica, benché basata sui principi ed i metodi della prospettiva sviluppati dai pittori rinascimentali, trova le sue prime applicazioni a partire dal 1839 quando A. Meydenbauer pubblica il primo saggio su un rilievo ottenuto da immagini<sup>10</sup>. Qualche anno più tardi, il colonnello francese A. Laussedat in una relazione che presentò alla Commissione dell'Accademia delle Scienze di Parigi, evidenziava come fosse stato possibile determinare le coordinate dei punti di



Fig. 34- Esempio di strumentazione MMS con supporto a braccio: X120GO, Stonex.



Fig. 35- Esempio di strumentazione MMS con esoscheletro indossabile: NavVis VLX, NavVis.

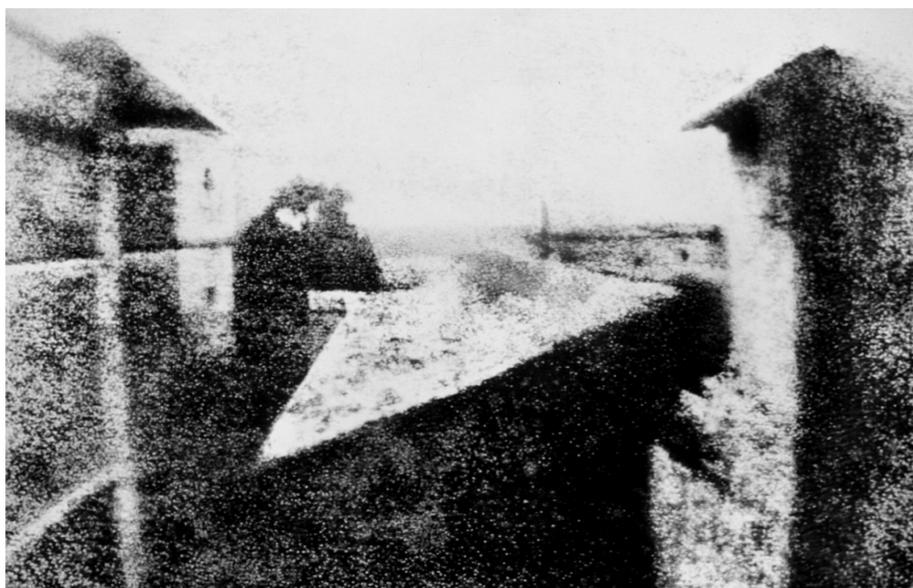


Fig. 36 – Joseph Nicéphore Niépce, la prima fotografia della storia.

un oggetto a partire da una coppia di immagini fotografiche mediante intersezione spaziale dei raggi<sup>11</sup>. Dagli inizi del Novecento, questa tecnica subirà continui e fondamentali sviluppi, con l'introduzione di calcolatori elettronici, l'utilizzo di camere non metriche e nuovi sistemi informatici per la gestione ed elaborazione delle immagini. Nasce così la possibilità di costruire modelli digitali tridimensionali a partire da immagini, tecnica meglio nota come image-base modeling. Tra le tecniche image-based, che si avvalgono della luce presente nell'ambiente per registrare immagini da elaborare successivamente al fine di derivarne informazioni tridimensionali del dataset osservato (Remondino & El-Hakim, 2006; Mueller et al, 2007; Campi et al., 2021), la fotogrammetria è la più nota. Difatti, essa è una scienza che consente di ottenere informazioni accurate, di tipo metrico e semantico, a partire da acquisizioni fotografiche catturate con sensori terrestri, aerei o satellitari. Nel dettaglio, il processo fotogrammetrico si basa sulla trasformazione dei dati, a partire da immagini bidimensionali, in informazioni tridimensionali, sotto forma di nuvola di punti, grazie alla definizione geometrica che intercorre tra i fotogrammi e la scena acquisita. Analogamente a quanto accade nella visione umana, se un oggetto viene ripreso in almeno due immagini, le diverse posizioni dell'oggetto nelle immagini consentono, per il metodo della parallasse, la definizione di una vista stereoscopica dell'area in sovrapposizione e, dunque, la derivazione di informazioni sulla terza dimensione. Inoltre, al fine di poter determinare le posizioni dei punti di un oggetto nella scena reale utilizzando le posizioni dei punti omologhi sulla fotografia, è necessario definire le relazioni geometriche che intercorrono tra le posizioni tridimensionali dei

punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia.

Il modello matematico a cui fa riferimento la tecnica fotogrammetrica per la descrizione geometrica dei fotogrammi è la prospettiva centrale. Forma e posizione dell'oggetto di studio vengono definiti determinando, per ogni immagine, la direzione spaziale di ogni raggio proiettivo che, collegando i punti P' nello spazio immagine e il corrispondente centro della prospettiva O', definiscono la posizione dei punti P nello spazio oggetto. L'intersezione di almeno due raggi proiettivi omologhi, appartenenti a diverse immagini, determina la posizione tridimensionale di un punto dello spazio oggetto. Il modello si basa, dunque, sul principio di collinearità secondo cui il centro di proiezione della camera, il punto sull'immagine e il suo corrispondente nello spazio, giacciono sulla stessa retta definita "retta di collinearità"<sup>12</sup>(Fig. 37). Sulla base delle osservazioni fatte, si deduce che la fotogrammetria, per poter essere applicata correttamente, ha dovuto attendere che si sviluppassero le conoscenze necessarie sia nell'ambito della geometria descrittiva che della fotografia: nota la prospettiva ed i procedimenti geometrici "inversi", per ricavare da essa le proiezioni ortogonali dell'oggetto reale, è stato possibile ricavare informazioni metriche dalle rappresentazioni fotografiche, prima in modalità geometrica proiettiva, poi in modalità analitica ed infine digitale. In realtà, la tecnica fotogrammetrica, fino all'avvento del digitale, era considerata una procedura consolidata, grazie alle sue profonde radici storiche, ma al contempo, obsoleta e costosa. Essa, subirà importanti e continui sviluppi, a partire dal 1990, divenendo alla fine del secolo la protagonista indiscussa in più campi d'indagine e settori disciplinari: dal tradizionale impiego industriale al gaming, dalla documentazione del patrimonio al cinema, dal monitoraggio all'ambito medico. Merito degli avanzamenti tecnologici raggiunti nell'ambito della Computer Vision che ne hanno ampliato le prestazioni con sistemi di elaborazione quasi del tutto automatizzati e con strumentazioni e sensori di diversa dimensione, economici, facili da trasportare e con potenzialità di altissima precisione.

Per quanto concerne le fasi operative, l'intero processo fotogrammetrico, segue un workflow articolato in una serie di passaggi: (i) acquisizione dei fotogrammi; (ii) calibrazione e orientamento della fotocamera; (iii) estrazione delle misurazioni tridimensionali; (iv) generazione del modello poligonale; (v) texture mapping e visualizzazione che a loro volta possono distinte in tre fasi principali:

1) fase di acquisizione dei fotogrammi: operazioni riguardanti la presa delle

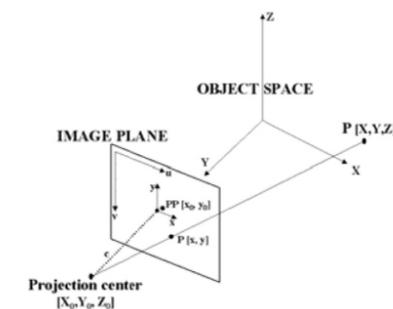


Fig. 37 - Principio di collinearità: relazione tra il centro di proiezione prospettica della fotocamera, un punto dell'immagine e il suo corrispondente nello spazio.

immagini fotografiche, effettuate con opportune macchine fotografiche, dette camere, e opportune tecniche.

2) fase di orientamento delle immagini e ricostruzione del modello tridimensionale: operazioni preliminari per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa e i piani fotografici con la stessa posizione nello spazio che avevano al momento della presa, quindi la ricostruzione della forma e delle dimensioni dell'oggetto ripreso.

3) fase di restituzione ossia formalizzazione numerica o grafica delle caratteristiche dimensionali dell'oggetto per la sua misurazione: operazioni che consentono di effettuare misurazioni sul modello dell'oggetto ricostruito, in grado di produrre, come risultato finale, un disegno, un insieme numerico di coordinate o una immagine raddrizzata.

Dal punto di vista operativo, il protocollo prende avvio dalla fase di registrazione delle immagini che è un aspetto molto importante della tecnica fotogrammetrica. La qualità delle immagini è uno dei fattori che incide fortemente sull'intero processo di ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. È indispensabile, dunque, pianificare in questo step le operazioni di ripresa, la scelta del sensore fotografico e la strategia di acquisizione dei fotogrammi che condizionano fortemente il risultato finale.

La qualità delle immagini acquisite dipende da svariati fattori alcuni riconducibili a:

- risoluzione del sensore fotografico;
- obiettivi;
- controllo e impostazioni di scatto;
- illuminazione;

Le moderne fotocamere digitali catturano la luce su un supporto elettronico, che codifica numericamente le informazioni acquisite in una matrice di valori di luminanza. Esse consentono di registrare immagini costituite da milioni di pixel per cui la risoluzione è molto alta. Tali parametri valgono per le tre categorie principali categorie disponibili in commercio ed utilizzate a livello professionale (compatte, reflex e bridge).

Oltre alla risoluzione del sensore, al fine di acquisire immagini nitide, è fondamentale anche la scelta della tipologia di obiettivo da utilizzare (Fig.

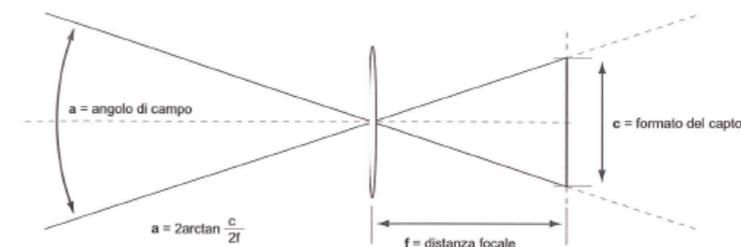


Fig. 38 – Relazione tra la distanza focale, il formato del sensore e l'angolo di campo.

38). Gli obiettivi sono composti da lenti che si spostano reciprocamente in base alla distanza di messa a fuoco e possono essere classificati in:

- obiettivi a focale fissa;
- obiettivi a focale variabile;

A loro volta, in base alla lunghezza focale (espressa in mm) si distinguono in:

- grandangolari, con focali che variano tra 18 ai 35 mm.
- normali o standard, con focali che variano dai 38 a 50 mm.
- teleobiettivi, con focali superiori a 50 mm.

Altri fattori che incidere significativamente sulla immagine sono:

- la messa a fuoco, automatica o manuale.
- le modalità di esposizione dell'immagine.

In tal caso è necessario fare alcune considerazioni. La quantità di luce che arriva al sensore digitale e che consente di acquisire l'immagine è funzione di due parametri, ovvero l'apertura del diaframma, che regola la quantità di luce che attraversa l'obiettivo, e la velocità di otturazione, che rappresenta il tempo in cui l'otturatore permette alla luce di passare la lente e raggiungere il sensore. In particolare, se tali fattori non sono ben bilanciati attraverso la regolazione dell'apertura del diaframma, dei tempi di scatto e dei valori ISO, si generano immagini con una sovraesposizione o una sottoesposizione inutilizzabili ai fini del procedimento fotogrammetrico. Pertanto, per ovviare a tale problema, in fase di acquisizione si prediligono condizioni di illuminazione quanto più omogenee possibili con il settaggio di parametri di esposizione medi per tutte le immagini. Qualora questo scenario non sia plausibile, è doveroso correggere l'esposizione delle immagini in fase di post-produzione. Oltre la qualità dell'immagine, gli altri fattori che incidono significativamente sull'intero processo sono le caratteristiche morfologiche, dimensionali ed ambientali del manufatto da

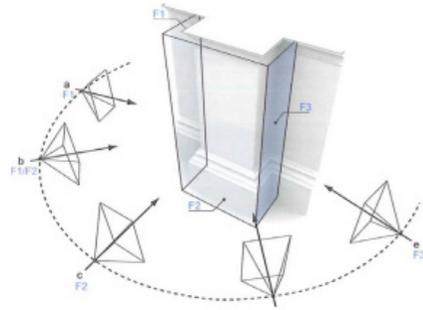


Fig. 39 – Ripresa fotografica ad assi paralleli.

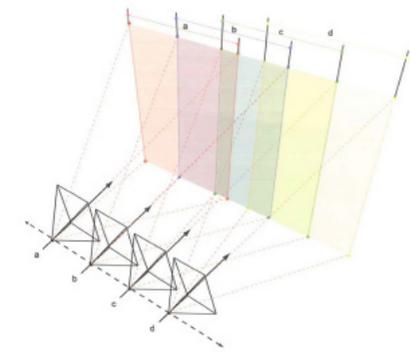


Fig. 40 – Ripresa fotografica ad assi convergenti.

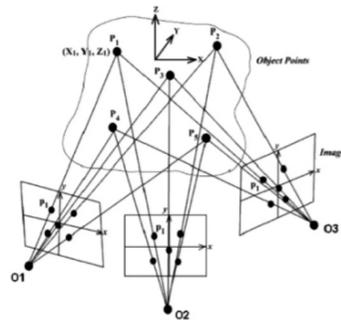


Fig. 41 - Metodo di bundle adjustment.

rilevare. Esse, infatti, influenzano, insieme alle condizioni di accessibilità e visibilità la scelta della modalità di acquisizione dei fotogrammi. Per quanto concerne questa fase è molto importante effettuare delle riprese fotografiche pianificando, in precedenza, il percorso di acquisizione delle immagini in relazione alla geometria, alle dimensioni del sito o del manufatto od oggetto e rispettando in situ le regole di distanza e di sovrapposizione tra un fotogramma e l'altro, stimate in funzione della risoluzione finale scelta per il rilievo. In generale, le tecniche di riprese fotogrammetria vengono classificate in due tecniche di acquisizioni principali. Nella ripresa “assi convergenti” i fotogrammi vengono acquisiti ruotando intorno all’oggetto, mirando al suo baricentro e posizionando l’asse di mira a 45° rispetto a un piano dominante. In questa fase, è consigliato scattare anche immagini in modo parallelo al piano dominante al fine di migliorare la qualità della texture (Fig. 39). Nella ripresa, invece, “ad assi paralleli” le immagini si ottengono mantenendo il piano della camera parallelo al piano dominante (Fig. 40). Di norma, nella fase di campagna, per ottenere un buon risultato vengono utilizzate, sia per rilievi terrestri che aerei, entrambe le tecniche che consentono la lettura del manufatto nel suo complesso e su più livelli di profondità. L’ultima, invece, è la tecnica di acquisizione a “ripresa panoramica” che permette l’acquisizione delle informazioni spaziali, da un solo punto di presa, avvalendosi dell’ausilio di un treppiedi e di una testa panoramica che consente di selezionare l’angolo di rotazione insieme al numero di scatti. Infine, in questa fase, vanno prese in considerazione anche le distorsioni intrinseche della camera digitale. Oggigiorno, molti dei software fotogrammetrici in commercio sono stati implementati da algoritmi che consentono di stimare e calcolare, con procedure automatiche, i parametri interni della camera nella cosiddetta *Test Field Calibration*. A partire da una serie di immagini note all’elaboratore, vengono stimati l’orientamento della camera ed i parametri di calibrazione, nonché la misura d’errore generata dall’obiettivo utilizzato. Una volta definiti i parametri delle camere dall’architetto rilevatore che gioca un ruolo fondamentale all’interno dell’intero processo, la costruzione del modello tridimensionale digitale avviene in modalità semi-automatica grazie all’incremento delle capacità computazionali raggiunte in questo campo e dei numerosi protocolli di orientamento SfM (*Structure for Motion*). Con lo sviluppo di questi sistemi software sempre più evoluti per la gestione ed elaborazione delle immagini ne deriva una nuvola di punti, sparsa o densa, che si avvale degli algoritmi di image matching e bundle adjustment (Fig. 41) per la ricostruzione dell’oggetto rilevato<sup>13</sup>.

Dal dato puntiforme è poi possibile generare un modello poligonale o mesh con protocolli di meshing. Una volta generato il modello poligonale, è possibile ottenere una rappresentazione fotorealistica dell’oggetto tridimensionalmente attraverso procedure di texture mapping.

## Note

1 – Nell’ambito delle ricerche attinenti alla conservazione e al restauro dei beni culturali l’analisi diagnostica propedeutica al progetto di restauro è di fondamentale importanza. La corretta progettazione di qualsiasi intervento di recupero, manutenzione o restauro richiede approfondite verifiche preliminari che comprendono anche la mappatura del degrado, materialmente costituita da prospetti o fotopiani in cui le superfici ammalorate vengono delimitate e contrassegnate da un’apposita simbologia su appositi sistemi CAD. Ad oggi la mappatura del degrado delle superfici viene ancora prevalentemente eseguita manualmente con un riconoscimento visivo da parte dell’architetto sul campo. A tale scopo è stata elaborata una nomenclatura standardizzata e condivisa, descritta dalla Norma UNI 11182 del 2006 “Materiali lapidei naturali ed artificiali. Descrizione della forma di alterazione – Termini e definizioni che amplia e aggiorna la precedente normativa “Lesico NORM.A.L.” del 1988.

2- Il rilievo tridimensionale fornisce quattro informazioni: i) le tre coordinate del punto rilevato; ii) il valore della riflettanza, che cambia a seconda della natura del materiale. La riflettanza rappresenta la capacità dei corpi di riflettere il raggio laser; indica per ciascun punto di una superficie di materiale opaco, colpito da un raggio luminoso, il fattore di risposta, cioè il rapporto adimensionale tra la irradianza, o densità di flusso radiante incidente, e la emittanza, o densità di flusso radiante uscente. Il software a corredo dello scanner visualizza i risultati di scansione e codifica la riflettanza delle superfici con valori, indicati con DN (Digital Number), compresi tra 0 e 255. Al valore 0 corrisponde riflettanza nulla: si riferisce a quei corpi che assorbono completamente il raggio laser senza rifletterlo, i corpi neri per esempio, mentre il valore 255 sta ad indicare riflettanza massima.

3- I sistemi a triangolazione generano risultati con accuratezze molto elevate anche di 0,1 mm e la misurazione avviene sulla base del teorema del triangolo.

4 –Il termine L.A.S.E.R è il noto acronimo dall’inglese Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation che indica un dispositivo optoelettronico in grado di emettere una radiazione elettromagnetica – onda luminosa- intensa, coerente e direzionale che può essere ultravioletta (da 200 a 400nm di lunghezza d’onda), visibile (tra i 400 e i 700nm), o infrarossa (tra i 700nm e 1mm). Ai fini della sicurezza è stato introdotto un nuovo parametro chiamato Limite di Emissione Accettabile – LEA che individua 5 classi: 1, 2, 3A, 3B e 4, con indice di pericolosità crescente con il numero di classe. <https://www.fe.infn.it/~evangelisti/Sicurezza/sicurezza%20laser.pdf>.

5 - Pulsed Wave – PW il valore è pari a  $2,9979 \times 10^8$  m/s.

6 – Nel 2007 l’International Standard Organization ha definito i tre fattori (risoluzione, incertezza e accuratezza) che determinano la qualità del prodotto digitale inserendoli nel Vocabolario internazionale di Metrologia. La risoluzione indica il minimo passo di

campionamento possibile mentre i valori di accuratezza ed incertezza dipendono rispettivamente dall'errore sistematico o casuale, insito nella misurazione stessa.

7 – I target o marker artificiali sono degli oggetti fisici che vengono collocati nello spazio durante le operazioni di rilievo e sono di fondamentale importanza per la registrazione dei dati acquisiti. I target artificiali possono essere di vario tipo a seconda della forma, dimensione e materiale e si suddividono in sferici o piani. Il target piano è tipicamente di forma quadrata o rettangolare anche se ne esistono di forma rotonda a seconda delle esigenze e comodità dell'operatore; Il target sferico consente la massima efficienza di scansione da diverse direzioni ed è rivestito da una particolare vernice bianca che garantisce resistenza e eccellenti proprietà riflettenti.

8 – <https://www.navvis.com/vlx>

9 - Joseph Nicéphore Niépce (Chalon-sur-Saône, 7 marzo 1765 – Saint-Loup-de-Varennes, 5 luglio 1833) è stato un fotografo e ricercatore francese. Deve la sua notorietà soprattutto per essere stato l'autore del primo scatto fotografico della storia, Veduta della finestra a Le Gras.

10- In seguito a una caduta da un'impalcatura durante i lavori di misurazione, l'ingegnere edile, architetto e fotografo tedesco Albrecht Meydenbauer mise a punto, a partire dagli anni 1860, una tecnica fotografica in grado di sostituire le operazioni di misurazione manuali. Con l'ausilio della trigonometria e di una camera fotografica di sua invenzione sviluppò una tecnica di misurazione fotografica per il rilievo di edifici e terreni, oggi nota come fotogrammetria. Le uniche camere fotografiche ancora esistenti dell'ingegnere sono conservate nel Gabinetto delle stampe della Biblioteca nazionale svizzera, nonché un fondo contenente fotogrammi di notevole importanza per la storia della fotografia.

11- In quegli anni la tecnica fotogrammetria si sviluppò anche nel campo dei rilievi topografici. Nel 1851 il colonnello francese Laussedat iniziò a studiare il modo per sostituire le prospettive disegnate a mano con le fotografie definendo tale metodo "Metrografia".

12- Le equazioni di collinearità sono due espressioni che indicano la relazione tra le coordinate da un punto in un sistema tridimensionale di coordinate e le coordinate del suo pixel proiezione centrale su un piano dell'immagine.

13- Per codesti passaggi ci si avvale, durante la fase di processamento, dell'ausilio di alcuni software fotogrammetrici come Agisoft Metashape, 3DF Zephyr, Pix 4D, Reality Capture ecc.

### **3.1 Il monitoraggio continuo: la gestione del modello digitale**

Per verificare e validare l'applicabilità ed efficacia della metodologia teorizzata, la terza parte del lavoro che vediamo in seguito, è stata interessata dalla gestione dei dati grezzi raccolti nelle precedenti fasi di rilevamento per definire un modello previsionale, concentrandosi in particolare sulle forme di degrado superficiale presenti all'interno del Quadriportico della Cattedrale di San Matteo. L'applicazione di tale metodologia è stata operata con l'obiettivo di sperimentare su un caso studio di particolare interesse la realizzazione di operazioni di monitoraggio predittivo tali da rendere fruibili i dati raccolti durante la fase di campagna ed orientare l'indagine diagnostica preliminare al progetto di restauro. Come è stato sottolineato nei capitoli precedenti, il monitoraggio del degrado superficiale rappresenta tutt'ora un problema di più complessa risoluzione rispetto alle forme di degrado strutturale. Tale motivo è dovuto alla difficoltà di raccolta dei dati morfo-metrici e dall'elevata variabilità che caratterizza il dato stesso. Seppur al giorno d'oggi sono sempre più diffuse attività e strumentazioni capaci di acquisire dati utili alla programmazione delle indagini diagnostiche per lo stato di conservazione delle strutture interessate, gli studi attualmente presenti in letteratura non si soffermano sul trattare modelli previsionali ma di testare processi algoritmici capaci tanto di estrapolare tanto di associare al modello tridimensionale una serie di informazioni critiche dei dati acquisiti. Per rispondere alle domande

di ricerca prefissate, le attività sono state suddivise in più fasi operative che, a partire dall'organizzazione del dato metrico, hanno portato all'esplicitazione di un modello previsionale prefigurato. Pertanto, viene proposta una metodologia che si distingue dagli approcci finora utilizzati in letteratura in quanto considera anche l'aspetto previsionale del dato. In particolare, poiché le fasi della metodologia possono essere ricondotte, nel dominio dell'Intelligenza Artificiale, al processo di *Knowledge Discovery in Databases* o KDD (Piatetski-Shapiro and Frawley, 1991; Piatetski-Shapiro et al., 1992; Matheus et al., 1993; Fayyad et al., 1996), nella prima parte è presente un breve excursus su tale processo e sulla sua importanza, anche in scenari di *Big Data*. Successivamente, vengono analizzate nel dettaglio le fasi che caratterizzano la metodologia proposta e in particolare, la *pipeline* operativa seguita nell'ambito di tale sperimentazione per estrapolare nuova conoscenza dai dati, cioè per trasformare il dato grezzo ed apparentemente sterile in contenuto informativo prezioso per il *decision maker*. Nell'ultima decade, in diversi settori disciplinari si è ampiamente discusso dell'importanza dei *Big Data*<sup>1</sup> e delle tecniche di *Data Analytics* attraverso le quali è possibile estrarre conoscenza e/o valori previsionali dai dati, al fine di migliorare e supportare strategie decisionali, efficienti ed efficaci. Tra le varie tecniche utilizzate vi è la *predictive maintenance*<sup>2</sup>, che si è vista essere di fondamentale utilità per contribuire a ridurre sprechi di tempo e risorse (Al-Najjar. and Alsyouf 2003; Yeardley et al., 2022). Tuttavia, per sfruttare questi vantaggi e ottenere valore aggiunto dai dati, è indispensabile eseguire processi analitici corretti e ripetibili, altrimenti le informazioni ricavate potrebbero essere fuorvianti o addirittura errate. Il percorso di estrazione di nuova conoscenza da dati grezzi è noto nel campo informatico come *Knowledge Discovery Process* o KDD ed è un processo iterativo ed interattivo che ha come obiettivo l'identificazione semi-automatica di correlazioni tra dati.

Il KDD è caratterizzato da più fasi, tra le quali la più importante, è quella del *Data Mining* (Witten et al., 2011). Con il termine *Data Mining* si fa riferimento a quell'insieme di algoritmi e metodi che hanno come fine l'estrapolazione di un massiccio numero di informazioni a partire da elevate quantità di dati (Theobald, 2017). Le soluzioni di *Data Mining*, basandosi su approcci statistici, permettono di scoprire correlazioni associazioni, schemi ricorrenti e/o anomalie nei dati considerati. Formalmente, per indicare il risultato dell'estrazione dei dati, si utilizza il termine *Pattern*<sup>3</sup>, che sta ad indicare una rappresentazione sintetica che sia comprensibile, potenzialmente utile, valida e precedente-

mente sconosciuta. Quindi, partendo da contenuti “criptati”, eterogenei, ridondanti e non strutturati, si giunge ad una conoscenza sfruttabile in molti campi di applicazione. Le tecniche di *Data Mining* nascono intorno agli anni Ottanta per superare i limiti delle tradizionali tecniche deterministiche di analisi dei dati, le quali hanno come obiettivo quello di verificare o rifiutare un'ipotesi presa ad oggetto di studio. Le nuove tecniche statistiche, al contrario, prevedono la generazione automatica di ipotesi proprio a partire dall'analisi dei dati, cioè sono algoritmi che, in modo automatico, identificano schemi, relazioni e in cui dati sono i veri protagonisti. In altre parole, con il *Data Mining* (Dulli et al., 2009) non si vuole necessariamente rispondere ad una domanda specifica o confermare un'ipotesi, ma anche cercare di ricavare nuove informazioni potenzialmente utili ed interessanti a partire da un dataset sconosciuto. Proprio per questa differenza con le tecniche tradizionali, si può affermare che il *Data Mining* si configura come l'integrazione di più discipline, quali la *statistica*, il *machine learning* e l'*intelligenza artificiale*<sup>4</sup> (Fig. 42) Infatti, si sviluppa sui concetti tipici della statistica tradizionale come l'utilizzo del campionamento, la stima e i test d'ipotesi, ma con l'integrazione di algoritmi, modelli e tecniche di apprendimento automatico tipiche del *machine learning* e dell'intelligenza artificiale (Di Martino and Origlia, 2020). Esistono due principali famiglie di soluzioni di *Data Mining*, basate su:

- Modelli descrittivi: identificano nel dataset gruppi di dati tra loro correlati o individuano correlazioni frequenti. L'obiettivo è quindi quello di estrapolare pattern che riassumono le relazioni tra i dati non note a priori.
- Modelli predittivi: richiedono una conoscenza a priori sui dati e hanno come obiettivo quello di classificare gli eventi futuri e cioè di prevedere il valore di un determinato attributo sulla base dei valori assunti da altri attributi noti.

Nel caso specifico, il lavoro focalizza l'attenzione su quelli che sono i modelli predittivi (Cafasso, 2020).

### 3.2 Processo di Knowledge Discovery dai dati

Il processo KDD di estrazione della conoscenza dai dati può essere visto come suddiviso in cinque macro-passi, come mostrato in figura, trami-

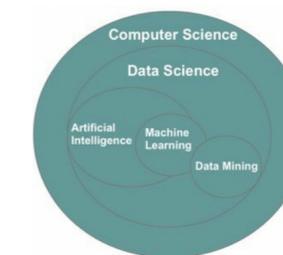


Fig. 42 - Rappresentazione visiva degli ambiti della Computer Science.

te cui si estraggono informazioni e pattern significativi all'interno di una grossa mole di dati e che possono essere utilizzati e scelti in base all'obiettivo dell'analisi. In letteratura sono presenti una molteplicità di algoritmi per ognuno di questi passi. Il Data Analyst è quindi chiamato a identificare e/o proporre nuove tecniche per ognuno dei passi di seguito descritti, in base alle caratteristiche peculiari del dataset e del dominio affrontato.

È doveroso ricordare che prima di iniziare a percorrere il vero e proprio *Knowledge Discovery Process* (Fig. 43) è importante soffermarsi su una fase preliminare molto significativa. Come prima cosa è fondamentale comprendere e conoscere il dominio applicativo, l'ambito di raccolta dei dati e gli obiettivi dell'analisi. A tal fine, risulta particolarmente importante il supporto e la collaborazione da parte degli esperti di dominio (Cioffi, 2020; Caputo, 2020).

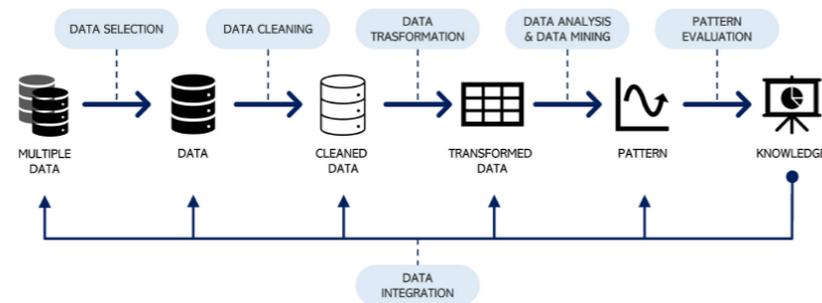


Fig. 43- I diversi step del processo KDD.

#### - Data Selection

Il primo passo del *Knowledge Discovery Process* è la selezione dei dati. Quando si inizia una nuova analisi ci si trova di fronte ad un dataset ricco di dati eterogenei, alcuni dei quali potenzialmente non rilevanti per il problema trattato. Poiché tali dati non rilevanti potrebbero fuorviare gli algoritmi di apprendimento statistico, è fondamentale selezionarne una porzione rilevante, cioè è importante considerare nell'analisi solo un campione rappresentativo del dataset a partire dal quale si generalizzeranno i risultati ottenuti. Il campione deve essere "rappresentativo" nel senso che deve mantenere e rappresentare tutte le caratteristiche del dataset. In questo modo, si opererà solo sui *target data* (o dati obiettivo) e non si avranno difficoltà dal punto di vista computazionale.

#### - Data Preprocessing

La seconda fase del *Knowledge Discovery Process* è molto importante e può

anche risultare molto complessa. Nella fase di *preprocessing* si elaborano i dati al fine di aumentarne la qualità e renderli più adatti per i successivi algoritmi di previsione. Infatti, i dati reali solitamente non sono adatti per essere utilizzati così come sono, in quanto possono esserci valori mancanti, dati che non appartengono ai range ammessi ed errori di varia natura che, se non gestiti, influirebbero negativamente sulla qualità dei risultati degli esperimenti. Ad esempio, in questo step è possibile eliminare informazioni ridondanti, colmare dati mancanti o rimuovere dati corrotti o parziali. Questa fase è nota come *Data Cleaning* e consiste nella gestione delle anomalie e quindi nella rimozione effettiva di dati *noise* e negli *outliers*<sup>5</sup> presenti nei *selected data* e nella risoluzione di eventuali problemi come valori mancanti o la presenza di dati inconsistenti. A questa fase potrebbe essere associata una seconda nota come *Data Integration*. Questo step potrebbe essere messo in atto qualora si abbiano a disposizione più dataset differenti che tra loro potrebbero integrarsi per arricchire i contenuti delle analisi. Ad esempio, se si sta effettuando uno studio su un dataset che riguarda il degrado superficiale, potrebbe essere interessante associare un dataset con i dati ambientali per trovare eventuali correlazioni e informazioni aggiuntive.

Infine, l'esito di un'analisi è affidabile quando è frutto di dati attendibili e di qualità e proprio per questo motivo è importante la fase in esame.

#### - Data Transformation

In fase di *data transformation* si effettuano ulteriori modifiche sui dati selezionati in base alle analisi che si vogliono effettuare nella fase successiva di *Data Mining* e gli obiettivi da raggiungere. Ad esempio, in questo step vengono selezionati gli attributi di interesse ed eventualmente aggiunti altri che possono essere importanti per la rilevazione di pattern o per la fase di previsione vera e propria. Ad esempio, si possono effettuare operazioni di *sampling*<sup>6</sup> e *feature selection*<sup>7</sup> per selezionare solo gli attributi rilevanti al fine delle analisi. Inoltre, i dati possono essere trasformati e convertiti attraverso cambiamenti di scala e/o operazioni matematiche. Alcuni algoritmi hanno infatti difficoltà a gestire informazioni rappresentate su scale significativamente differenti. L'obiettivo di questa fase è quindi di rappresentare i dati in modo tale che siano congeniali alle analisi.

#### - Data Mining

A questo punto si passa alla vera e propria fase di *Knowledge Extraction* che

prevede l'utilizzo di algoritmi e tecniche di Data Mining. È importante identificare l'obiettivo del *Knowledge Discovery Process* per capire quale algoritmo si deve applicare per rilevare il *pattern* o estrarre il *trend*.

Una volta ben chiari gli obiettivi e scelti gli algoritmi, questi si potranno applicare, eventualmente valutando anche l'impatto di differenti parametri, per ottenere migliori prestazioni.

#### - Data Interpretation

Nella fase conclusiva del processo di *Knowledge Discovery*, il *Decision Maker* valuta i risultati ottenuti con le analisi effettuate. Quest'ultimo step permette di consolidare la conoscenza estratta e di ricavare quelle informazioni che potrebbero essere utili e di supporto al processo decisionale.

### 3.2.1 Time Series Prediction

Nella metodologia di Knowledge Discovery proposta, al fine di sfruttare i dati raccolti nelle fasi di rilevamento e predire i fenomeni di degrado, viene analizzato un particolare scenario che prende il nome di *Time Series Prediction* (Chatfield, 2000; Hastie et al., 2009; Mishra and Sanjay, 2012). Una time series è una collezione di osservazioni e dati raccolti nel tempo, la cui relazione temporale va tenuta in debita considerazione nell'analisi della serie. Secondo la letteratura, una *time series* può essere suddivisa in almeno tre parti costitutive<sup>8</sup>, ovvero:

- i) Il *trend*. L'andamento crescente o decrescente della serie nel tempo;
- ii) La stagionalità. Un andamento della serie temporale che si ripete ciclicamente nel tempo;
- iii) Il rumore. La variabilità dei dati che non riesce ad essere spiegata dal modello.

La figura 44 mostra un esempio di come una *time series* può essere decomposta nelle parti sopracitate. Per l'analisi previsionale di dati temporali si fa riferimento alla famiglia di soluzioni note come *time series forecasting*. Queste sono tecniche tramite cui è possibile predire gli eventi futuri in base all'analisi dei dati passati, basata sull'assunzione che probabilmente il trend futuro sarà simile a quello passato. Tale tecnica è parte di una disciplina più ampia, ovvero la *predictive analytics*, che si occupa di esaminare dati attuali e storici, attraverso tecniche statistiche e di *machine learning*, per prevedere *trend* futuri o determinare la probabilità che un evento si verifichi<sup>9</sup>.

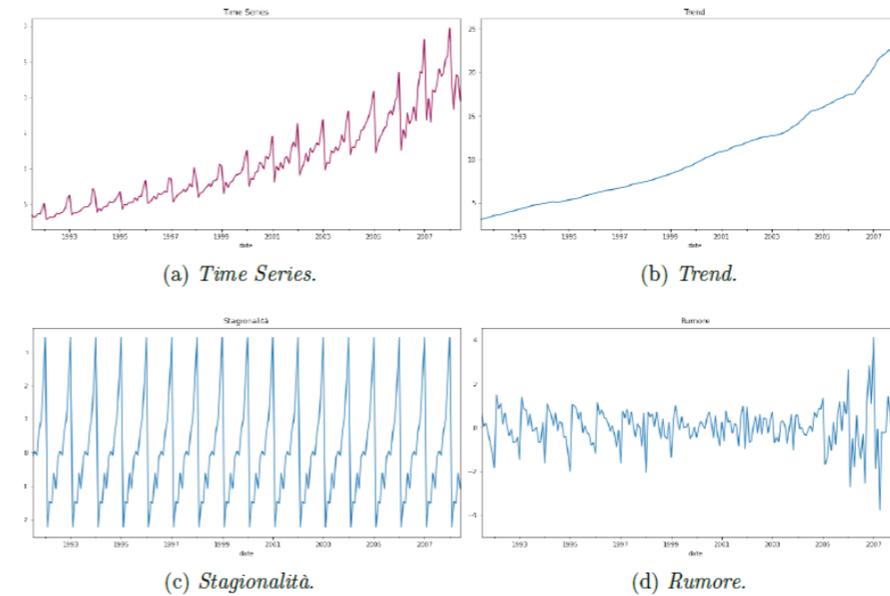


Fig. 44 - Decomposizione della time series.

In base al numero di campioni futuri che si intende predire (parametro noto come *horizon*) si distingue un *forecasting* di tipo:

- *Long-term*;
- *Medium-term*;
- *Short-term*;

Infine, con il termine *history*, si indica il numero di campioni storici in base ai quali si predice il valore futuro (Fig. 45).

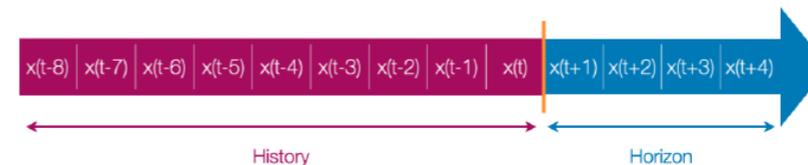


Fig. 45 - Time series forecasting.

In letteratura, le tecniche di *time series forecasting* sono molteplici e si differenziano a seconda dell'obiettivo con cui le si intende applicare. Generalmente sono classificate in due gruppi:

- i) Tecniche parametriche. Assumono che il processo stazionario stocastico sottostante la *time series* abbia una struttura che può essere descritta con un numero di parametri, il cui valore dev'essere determinato per effettuare la previsione;

ii) Tecniche non-parametriche. Non fanno alcuna assunzione sulla particolare struttura del processo. Molti metodi di *Machine Learning* sono non parametrici.

In questa fase del lavoro, per effettuare il monitoraggio previsionale delle aree degradate ci soffermiamo unicamente alle tecniche parametriche con un modello previsionale che si basa sulla tecnica di *Data Mining* di Regressione Lineare. Segue un approfondimento sul modello previsionale adottato nella terza parte del testo e su alcune tecniche di *Data Mining* presenti in letteratura.

### 3.2.2 Regressione Lineare

Il modello di regressione lineare è una tecnica statistica che si utilizza per studiare la relazione tra due o più variabili (Schuld et. al, 2016; Liang et., 2022). Il termine fu formulato per la prima volta dal biologo inglese Galton a fine Ottocento ed ha lo scopo di stimare e prevedere il valore di una variabile in base al valore di una o più variabili<sup>10</sup>.

Nell'analisi di regressione la variabile i cui valori sono da stimare viene detta *variabile dipendente* (o variabile risposta), mentre quelle da cui questi valori in certa misura dipendono vengono chiamate *variabili indipendenti* (o regressori, o variabili esplicative). Il modello che è caratterizzato da più di una variabile esplicativa per effettuare previsioni prende il nome di modello di regressione multipla; viceversa, se la variabile esplicativa è unica, si parla di modello di regressione semplice e dunque, si studia la relazione tra due variabili. Oltre ad ottenere valori numerici per la variabile dipendente, il modello di regressione permette al contempo di identificare il tipo di relazione matematica che intercorre tra la variabile indipendente e la variabile dipendente<sup>11</sup>. La natura di tale relazione può essere rappresentata da funzioni matematiche semplici fino ad altre estremamente complesse.

Nello specifico, un modello di regressione lineare può essere delineato da:

- Una sola variabile risposta quantitativa (detta anche dipendente o Y);
- Una o più variabili esplicative (dette anche X o regressori);
- Un coefficiente di regressione per ogni variabile esplicativa più un coefficiente per l'intercetta ( $\beta$ );
- Un termine di errore ( $\epsilon$ ). Questo perché la relazione tra due variabili

non è quasi mai perfettamente riassumibile tramite un'equazione matematica;

Nello specifico, la variabile risposta (la Y) è determinata dai valori dell'intercetta ( $\beta_0$ ) a cui vengono sommati i valori delle variabili esplicative (le X) moltiplicate per i loro coefficienti ( $\beta$ ), più un termine d'errore ( $\epsilon$ ).

Pertanto, la tipologia di relazioni più semplice è quella lineare che corrisponde a una linea retta o a una superficie (fig.46), che viene descritta da una funzione lineare del tipo  $Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \epsilon$  se vi è un solo regressore,  $Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \epsilon$  se vi sono due regressori e nel caso generale di n variabili esplicative l'espressione assume la seguente formula:  $Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n + \epsilon$ .

Quest'ultima sarà tanto più lunga quanti più sono i regressori del modello.

La Regressione Lineare è supportata dalla maggior parte degli strumenti di data analytics, quali *Microsoft Excel*, *MATLAB*, *Sklearn*, *Python*, *Excel*, o da pacchetti software statistici, come ad esempio *IBM SPSS® Statistics*. In generale, questi applicativi semplificano notevolmente il processo di utilizzo delle equazioni di regressione lineare, dei modelli di regressione lineare e delle formule di regressione lineare.

### 3.2.3 Valore di R quadro

Per comprendere l'efficacia del modello e la sua capacità previsionale, si utilizzano una serie di misure definite "indici della bontà di adattamento", che analizzano quanta differenza c'è tra i valori osservati di y nel campione ed i valori che il modello ha stimato per y. Piccole discrepanze tra i valori indicano che il modello si adatta bene ai dati. Al contrario, se vi sono grandi discrepanze tra valori attesi ed osservati significa che il modello non adatta bene la variabilità presente nei dati<sup>12</sup>.

In particolare, nei modelli di regressione lineare viene analizzato il valore *R quadro*, detto coefficiente di determinazione o di adattamento ai dati. Generalmente la notazione in maiuscolo R quadro fa riferimento ad un modello di regressione lineare multipla mentre per il modello di regressione lineare semplice, si utilizza l'r quadro minuscolo. Tuttavia, il suo utilizzo oggi è talmente diffuso che anche per i modelli non lineari sono stati identificati una serie di indici simili, detti pseudo R quadro.

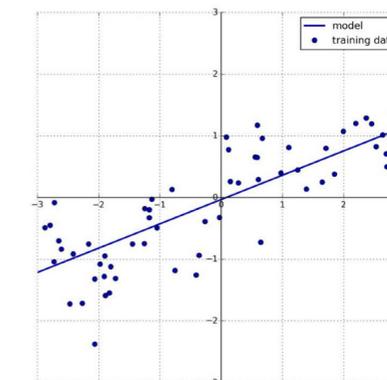


Fig. 46 – Modello di regressione lineare.

Il valore R quadro indica la variazione totale dei valori di  $y$  intorno alla media di  $y$  che risulta spiegata dal modello di regressione, ed il suo valore è sempre compreso tra 0 ed 1 (Fig. 47). Si ottiene un R quadro uguale a 0 quando le variabili predittive non spiegano per nulla la variabilità della  $y$  intorno alla sua media. Invece, un valore R quadro pari a 1 indica un modello le cui variabili indipendenti riescono a spiegare completamente la variabilità della  $y$  intorno alla sua media. Pertanto, conoscendo i valori delle variabili indipendenti puoi predire esattamente quale sarà il valore della  $y$ . Tale soluzione si verifica solo quando tutti nel grafico a dispersione tutti punti si collocano esattamente sulla retta di regressione. In generale, più alto è il valore dell'R quadro, più il modello ha un potere predittivo maggiore (Draper, 1998).



Fig. 47 – Interpretazione dei valori R2.

### 3.3 Decision Tree

Tra le altre tecniche di *Data Mining* si fa riferimento agli algoritmi di classificazione impiegati in quelle situazioni in cui si ha a che fare con complessi dataset di grandi dimensioni nei quali sarebbe impossibile estrapolare manualmente relazioni tra variabili (Drazin and Montag, 2012; Jayakameswaraiah and Ramakrishna, 2014; Banu, 2016; Patel and Prajapati, 2018).

I modelli di classificazione possono essere utilizzati in fase di *Data Mining* per due principali funzioni:

- Modelli predittivi: il classificatore è impiegato come modello predittivo quando attribuisce la label di classe ai dati che non erano etichettati.
- Modelli descrittivi: il classificatore può essere utilizzato per trovare le caratteristiche che meglio identificano le varie classi.

L'albero di decisione (*decision tree*) è una tecnica predittiva a grafo, utilizzata nel Data Mining, e caratterizzata da nodi, foglie ed archi (Safavian and Landgrebe, 1991).

- I nodi rappresentano gli attributi delle istanze. Il nodo più alto è definito nodo radice.
- Le foglie rappresentano il valore predetto per l'attributo target, a partire

dai valori delle altre *features*.

A loro volta le foglie possono essere classificate in:

- Pure, quando tutti i record che ricadono sulla foglia appartengono ad una sola classe.
- Impure, quando i record che ricadono sulla foglia appartengono a classi differenti.

Gli archi rappresentano i possibili valori che ciascun attributo può assumere; nel caso di attributi numerici determinano dei range di tali valori. La figura 48 mostra un esempio di albero di decisione. L'obiettivo dell'algoritmo di classificazione è quello di effettuare la classificazione di un'istanza a partire dal nodo radice. Successivamente, si osserva il percorso che questa effettua sull'albero - a seconda del valore dei propri attributi - fino a raggiungere una foglia, la quale rappresenta la classe a cui l'istanza viene associata. In particolare, l'approccio utilizzato da questo modello è di tipo *divide-et-impere*: si procede ricorsivamente, scomponendo il complesso problema di partenza in sotto-problemi più semplici, fin quando non si arriva a sotto-problemi sufficientemente piccoli da poter essere risolti (Fig. 49). A quel punto, si calcola la soluzione del problema originario, combinando opportunamente tutte le altre soluzioni. Come per tutti gli algoritmi di classificazione ci sarà una prima fase di training dove avviene la creazione dell'albero sui dati etichettati, la fase di test in cui si valida il modello e poi, successivamente, si potrà utilizzare l'albero per predire le labels dei dati non etichettati se il modello è risultato affidabile.

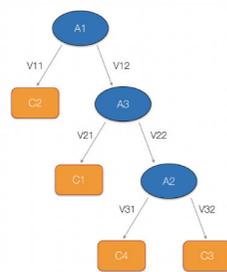


Fig. 48 – Struttura di un albero decisionale: nodi, foglie, archi.

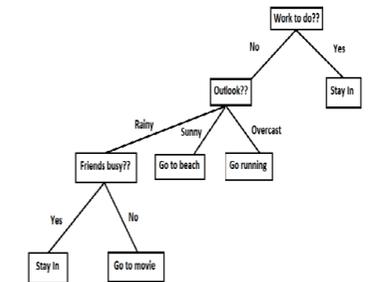


Fig. 49 – Esempio di Albero decisionale.

### 3.4 Reti neurali

Tra le altre tecniche di Data Mining, è importante menzionare anche le reti neurali. Le reti neurali sono sistemi di calcolo con nodi interconnessi, che funzionano in modo molto simile ai neuroni del cervello umano. Utilizzando gli algoritmi, possono riconoscere modelli e correlazioni nascoste nei dati non strutturati, raggrupparli e classificarli e, con il tempo, apprendere e migliorare continuamente. Una rete neurale è costituita da uno strato di input, a livelli nascosti e un livello di output. Ogni strato è costituito, a sua volta da nodi, simili ai neuroni del cervello umano.

La prima rete neurale fu concepita da Warren McCulloch e Walter Pitts

nel 1943 (McCulloch and Pitts, 1943). In quell'anno, i due pionieri pubblicarono un importante articolo sul funzionamento dei neuroni e diedero successivamente corpo alle loro idee, creando una semplice rete neurale per mezzo di circuiti elettrici. Questo modello rivoluzionario aprì la strada alla ricerca sulle reti neurali in due aree:

- i) Processi biologici nel cervello;
- ii) Applicazione delle reti neurali all'Intelligenza Artificiale (IA);

L'obiettivo originario dell'approccio alla rete neurale era quello di creare un sistema computazionale basato sul *problem solving*, simile al processo biologico che avviene nell'essere umano (Liu et al., 2017; Gonzalez-Dominguez., 2015). Tuttavia, nel corso del tempo, i ricercatori hanno spostato la loro attenzione sull'utilizzo di reti neurali per portare a termine compiti specifici, deviando da un approccio strettamente biologico. Da allora, le reti neurali hanno supportato diverse attività, tra cui la computer vision, il riconoscimento vocale, la traduzione automatica, il filtraggio dei social network, i giochi da tavolo e i videogiochi, nonché la attività di diagnosi medica. Successivamente, con l'incremento di notevoli quantità di dati, sono stati definiti i sistemi di deep learning che consentono l'acquisizione e l'estrazione di dati sempre maggiori, inclusi quelli non strutturati. I modelli di deep learning possono essere considerati un'evoluzione delle tecniche di *Data Mining* in quanto possono apprendere da soli le caratteristiche necessarie per il processo di classificazione. Esistono diverse tipologie di reti neurali e ognuna presenta vantaggi e svantaggi, a seconda dell'uso.

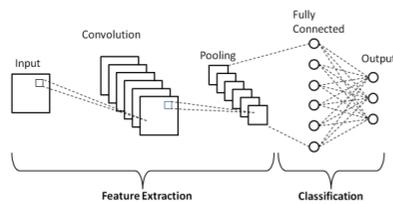


Fig. 50 – Architettura di una rete neurale CNN.

i) Le reti neurali convoluzionali (CNN, *Convolutional Neural Network*) comprendono cinque tipi di strati: *input*, *convolution*, *pooling*, *fully connected* e *output*. Ogni strato ha uno scopo specifico, come riassumere, connettere o attivare. Le reti neurali convoluzionali hanno diffuso la classificazione delle immagini e il rilevamento degli oggetti. Tuttavia, le CNN sono state applicate anche ad altre aree, come il *natural language processing* e le previsioni<sup>13</sup> (Fig. 50).

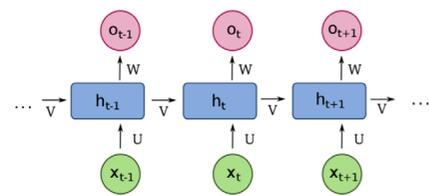


Fig. 51 – Architettura di una rete neurale RNN.

ii) Le reti neurali ricorrenti (RNN, *Recurrent Neural Network*) utilizzano informazioni sequenziali, come dati indicizzati in ordine di tempo provenienti da un dispositivo a sensore o una frase orale, composti da una sequenza di termini. A differenza delle reti neurali tradizionali, gli input di una rete neurale ricorrente non sono indipendenti l'uno dall'altro. Inoltre, l'output per ciascun elemento dipende dai calcoli sui suoi elementi prece-

deni. Le RNN vengono utilizzate nelle applicazioni per le previsioni e le serie temporali, nell'analisi del sentiment e in altre applicazioni di testo<sup>14</sup> (Fig. 51).

iii) Le reti neurali *feedforward*, in cui ogni perceptrone<sup>15</sup> di uno strato è connesso a ciascun perceptrone dello strato successivo e le informazioni avanzano in un'unica direzione, senza cicli di feedback<sup>16</sup> (Fig. 52).

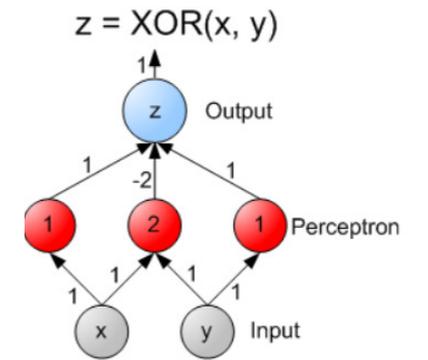


Fig. 52 – Architettura di una rete feedforward.

iv) Le reti neurali *autoencoder* vengono utilizzate per creare astrazioni chiamate codificatori, originate da un determinato insieme di input. Sebbene siano simili alle reti neurali più tradizionali, gli *autoencoder* cercano di modellare gli input stessi e quindi il metodo è considerato non supervisionato. La premessa degli *autoencoder* è quella di desensibilizzare ciò che è irrilevante e sensibilizzare ciò che è rilevante. Man mano che gli strati aumentano vengono formulate astrazioni aggiuntive a livelli superiori (strati più vicini al punto in cui viene introdotto uno strato di decodifica). Queste astrazioni, perciò, possono essere utilizzate da classificatori lineari o non lineari<sup>17</sup> (Fig. 53).

Negli ultimi anni, anche nel campo architettonico, sono state presentate una serie di studi e ricerche che si avvalgono dell'utilizzo di reti neurali per la classificazione e la segmentazione semantica di oggetti, operanti su dati grezzi di nuvole di punti (Caputo, 2015; Grilli et al., 2017; Grilli et al., 2018).

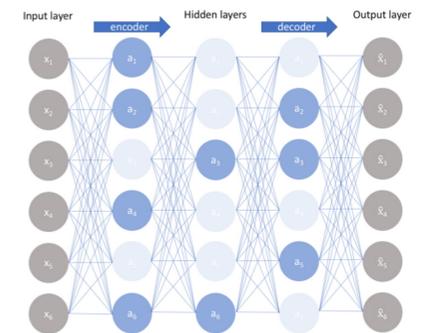


Fig. 53 – Architettura di una rete autoencoder.

### Note

1 - <https://www.bigdata4innovation.it/big-data/big-data-analytics-data-science-e-data-scientist-soluzioni-e-skill-della-data-driven-economy/>

2- Il processo di *Predictive Maintenance* (manutenzione predittiva) è un processo che beneficia molto della presenza di algoritmi di apprendimento automatico con capacità predittive (machine learning).

3- Nell'Intelligenza Artificiale il pattern è un sinonimo di schema, modello, esempio o meglio con il pattern si cerca un'informazione nascosta in una grande mole di dati (Big Data).

4- *Machine e Deep Learning* (ML / DL) sono campi di ricerca dell'Intelligenza artificiale interessati allo sviluppo di algoritmi che consentono la previsione dei mediante l'addestramento degli stessi.

5- Con il termine *outlier* o "rumore" si definisce in statistica in un insieme di osservazioni, un valore anomalo e aberrante, ossia un valore chiaramente distante dalle altre osserva-

zioni disponibili.

6- La fase di *sampling* è un processo utilizzato nell'analisi statistica in cui un numero predeterminato di osservazioni viene prelevato all'interno di un più ampio insieme.

7- La *feature selection* è il processo di riduzione del numero di variabili di input durante lo sviluppo di un modello previsionale. È auspicabile ridurre il numero di variabili di input sia per ridurre il costo computazionale della modellazione sia, in alcuni casi, per migliorare le prestazioni del modello. <https://machinelearningmastery.com/feature-selection-with-real-and-categorical-data/#:~:text=Feature%20selection%20is%20the%20process,the%20performance%20of%20the%20model.>

8- Dotis-Georgiou A. "An introduction to time series forecasting" in:

<https://www.infoworld.com/article/3622246/an-introduction-to-time-series-forecasting.html>

9- <https://www.sas.upenn.edu/~fdiebold/papers/paper72/Time%20Series%20Analysis%202006r1.pdf>.

10- <https://statics.teams.cdn.office.net/evergreen-assets/safelinks/1/atp-safelinks.html>.

11 - <https://paolapozzolo.it/regressione-lineare/>

12- <https://www.yimp.it/coefficiente-di-determinazione-r-quadro/>

13 - <https://it.mathworks.com/discovery/convolutional-neural-network-matlab.html>

14 - <https://www.developersmaggioli.it/blog/le-reti-neurali-ricorrenti/>

15 - Il perceptrone è un modello di rete neurale artificiale, il primo di questo genere, introdotto nel 1958 dallo psicologo statunitense Frank Rosenblatt.

16 - <https://humanativaspa.it/reti-neurali-feed-forward-e-recurrent-neural-network/>

17 - <https://www.html.it/pag/406472/gli-autoencoders/>

**PARTE TERZA**

**Il caso applicativo della Cattedrale di San Matteo a Salerno**

CAPITOLO QUARTO  
**La cattedrale di San Matteo a Salerno**  
tra vicende storiche e trasformazioni nel tempo

#### 4.1 L'egemonia normanna sul territorio campano

Nell'XI secolo dell'era cristiana, l'Italia vide il sorgere di una potente monarchia, quella normanna, che riuscì ad unificare sotto il proprio dominio le regioni del meridione, dopo gli inutili tentativi da parte dei Longobardi e dagli imperatori tedeschi. Nei primi anni del XI secolo, gruppi di cavalieri normanni cominciarono a giungere nell'Italia meridionale, come mercenari dei signori locali che erano in contrasto con il governo bizantino che controllava il Mezzogiorno. La concessione a Rainulfo Drengot del feudo di Aversa come ricompensa per i servizi prestati, incentivò l'arrivo di altri normanni che, nel 1043, sotto la guida di Guglielmo d'Altavilla, ottengono anche il feudo di Melfi, strappato ai bizantini (Borsi, 2018). In pochi anni, guidati da un altro membro della famiglia degli Altavilla Roberto il Guiscardo, i normanni conquistano gran parte dell'Italia meridionale, ponendo fine al dominio secolare dei bizantini nella regione. Allarmato dalle rapide conquiste normanne, papa Leone IX organizzò una spedizione militare; Tuttavia, i tentativi furono vani e nel 1053, fu sconfitto nella battaglia di Civitate in Puglia e costretto a stringere un'alleanza politica che nel 1059 culminò, grazie alla sapiente regia diplomatica di Ildebrando da Soana, negli accordi di Melfi tra Roberto il Guiscardo, Riccardo I d'Aversa e il nuovo papa Niccolò II (Arata, 1925).

Dopo aver conquistato l'Italia meridionale e averla unificata sotto un'unica corona, i normanni dedicarono la loro attenzione all'organizzazione di un potere politico centralizzato. Prima della loro venuta il meridione aveva conosciuto un forte frazionamento dei centri di potere: vi erano domini longobardi, bizantini, città libere governate da propri magistrati che solo nominalmente rispondevano all'imperatore d'Oriente. Inoltre, a partire dal IX secolo gli arabi avevano conquistato la Sicilia, sottraendola al controllo bizantino, facendola prosperare sia economicamente che culturalmente (Tramontana, 2000; Coppola, 2005). La storiografia recente ha definitivamente stabilito che il primo insediamento normanno in Italia meridionale fu quello di Ariano Irpino, la cui esistenza fu riconosciuta nel 1022 da Enrico II di Franconia. In seguito, altri cavalieri normanni si stabilirono nelle regioni meridionali, seguendo un'attenta strategia di politica matrimoniale (Delogu, 1984). L'insediamento normanno, nelle realtà locali di Terra di Lavoro, ha la sua definitiva consacrazione con il matrimonio di Rainulfo Drengot con la sorella di Sergio IV duca di Napoli, avvenuta tra il 1029 ed il 1030, grazie a cui il conte Rainulfo ottenne l'investitura della contea di Aversa. In realtà, fu solo con Roberto il Guiscardo che si riuscì ad unificare in un unico organismo politico le signorie normanne. In questa vicenda ricoprì un ruolo strategico Desiderio di Montecassino, eletto abate da Niccolò II nel 1058 e nominato nel 1059 suo vicario per la riforma dei monasteri della Campania, della Puglia e della Calabria. Grazie a ciò l'abate riuscì ad ottenere donazioni e protezione da parte dei nuovi arrivati (Fig. 54). Il Mezzogiorno, in seguito al consolidamento politico dei Normanni, vide una stabilizzazione delle province ecclesiastiche di Capua, Salerno e

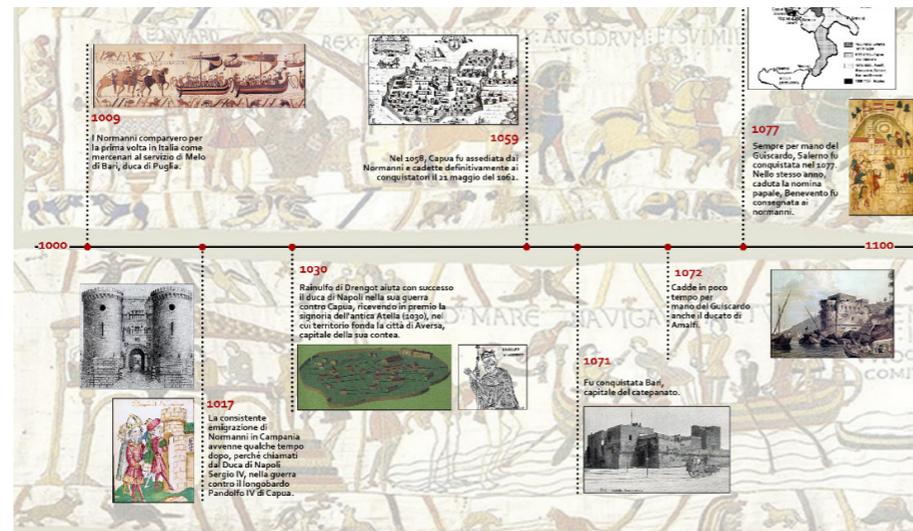


Fig. 54 - L'ascesa dei Normanni sul territorio italiano.

Benevento (Di Mauro, 1979). Con questo assetto politico-istituzionale e religioso si ebbe una vera e propria rinascita artistico-architettonica che culminò nel 1071 con la consacrazione della rinnovata basilica di Montecassino.

I siti di origini normanna individuati sul territorio campano sono: l'Abbazia di Montecassino, la cattedrale di Salerno, la cattedrale di Amalfi, il duomo di Capua, il duomo di Caserta Vecchia, il duomo di Sant'Agata dei Goti e i piccoli siti localizzati nel territorio di Teano, S. Pietro ad Montes, S. Angelo in Formis ed infine S. Maria in Cingla<sup>1</sup> (Figg. 55-56).

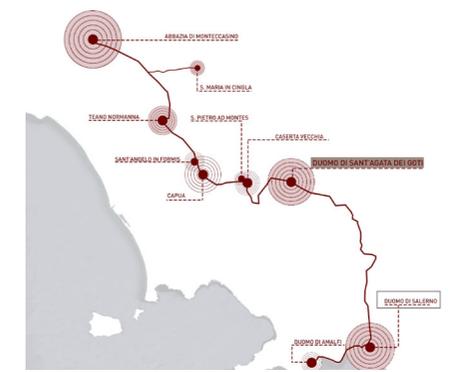
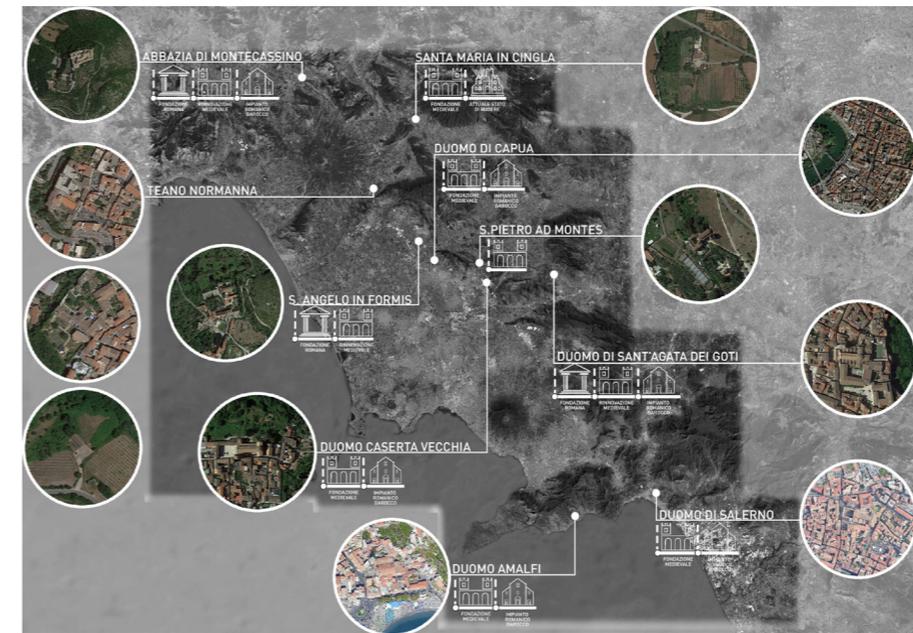


Fig. 55 - Individuazione dei siti di epoca normanna.

Fig. 56 - Architettura di epoca normanna in Campania e nel Lazio.

## 4.2 Premessa storica

Nella sua millenaria storia e nella sua fulgida ascesa, l'*Opulenta Salernum* (Carucci, 1990; Di Domenico et al., 2020) non solo godeva in tutto il mondo grande fama per la rinomatissima Scuola Medica e per essere stata scelta due volte a capitale del Regno ma anche per essere stata divulgatrice dell'arte romanica che nella Cattedrale di San Matteo "*rifulse come splendida gemma*". Difatti, il Duomo salernitano segnò nell'Italia Meridionale la prima realizzazione di arte romanica, nata in Francia verso l'anno mille e cinquanta, e che trovò nei Normanni i suoi più validi diffonditori (Carucci, 1962). Quest'arte dalle prime forme sperimentali, in meno di mezzo secolo, si espresse in imponenti edifici civili e religiosi e continuò poi brillantemente perfezionandosi ed espandendosi fondendosi e trasformando le preesistenti e quelle importate da altri luoghi. Si può dire che il

periodo d'oro del Monachesimo fiorì proprio durante il tempo trionfante di quest'arte. Col Monachesimo, il Cristianesimo si espanse velocemente e l'arte Romanica per rispondere alle nuove esigenze della fede trasformò le antiche chiese e templi pagani con edifici dalla pianta longitudinale, affiancata da navate laterali mentre si arricchisce di un nuovo elemento, il campanile che dona un aspetto ammirevole specialmente con la maestosità della sua base quadrata. Al contempo, tutto il complesso tende ad articolarsi di vari elementi, taluni indipendenti, contenuti nella compattezza dell'edificio (Pace, 2003). Quando i Normanni si stanziarono a Salerno, l'arte Romanica aveva già percorso molta strada. La città salernitana, a cavallo tra il XI e XII secolo, conobbe un periodo di grande potenza economica e culturale che si rifletteva sia nello sviluppo urbano sia nelle rilevanti opere monumentali che furono edificate. Così Roberto il Guiscardo, il principe che pose fine al plurisecolare potere longobardo, per ingraziarsi l'anima di chi aveva dovuto riconoscerlo come il più forte e il più valoroso, volle profondere tutto il suo oro nella costruzione della Cattedrale, dedicata al santo Matteo<sup>3</sup>. Sotto la guida di Alfano I, arcivescovo di Salerno, il Duomo conobbe a livello artistico il massimo splendore. Le maestranze che lavorarono alla costruzione della cattedrale tennero presente la robustezza romanica, ma vi profusero la varietà e la ricchezza delle policrome decorazioni nei marmi, nelle pietre, nei mosaici e nelle sculture che ancora oggi, dopo secoli, si possono ammirare (Fig. 57). Quando nel 1084 il papa Gregorio VII<sup>4</sup> benedisse la Cattedrale ebbe inizio da Salerno una nuova visione dell'arte romanica che si diffuse ben presto in tutta l'Italia Meri-

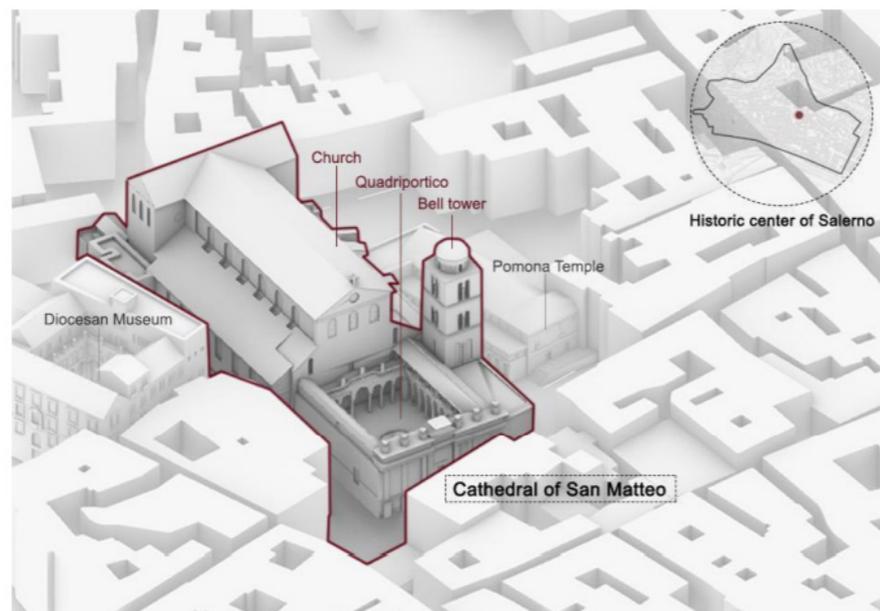


Fig. 57 - La Cattedrale di San Matteo nel centro storico della città di Salerno.

dionale. Così in tutte le cattedrali che sorsero da quella di Ravello a quella di Scala, da quella di Caserta Vecchia a quella di Sant'Angelo in Formis, da quella di Sant'Agata dei Goti a quella di Sessa Aurunca e alle tante altre, gli artisti cercarono sempre di imitare e ripetere lo stile, l'architettura e l'arte del Duomo di Salerno che divenne un faro di luce per le successive costruzioni (Abbate and Di Resta, 1984; Di Stefano, 1986).

### 4.3 La Cattedrale di San Matteo a Salerno

A differenza di altri importanti monumenti di età medievale, nessuna testimonianza o cronaca dell'epoca racconta le fasi di costruzioni del Duomo di Salerno. Nonostante ciò, alcune importanti notizie, seppur frammentarie, ci vengono restituite attraverso la raccolta delle fonti storiche e letterarie, costituite da brevi passi delle opere dei cronisti, dalle epigrafi delle lapidi e dall'analisi della morfologia delle forme architettoniche. Dal loro intreccio si evincono le vicende storiche e culturali che portarono alla fondazione del principale monumento del Medioevo cristiano. Tutto ebbe inizio quando nel 1079, l'arcivescovo Alfano I, rinvenne nella primitiva cattedrale le reliquie del santo Matteo, il cui corpo si trova in città già dal 954<sup>5</sup> ed era stato nascosto probabilmente da Gisulfo II, ultimo principe longobardo, durante l'assedio della città. Questa data segnò nella storia della Chiesa cristiana e della città di Salerno un evento memorabile non solo perché si pose fine alle numerose ricerche che si protraevano da anni, ma anche perché la Chiesa finalmente poté avere il corpo del suo primo Evangelista (De logu, 1977; Braca, 2003; Vaccaro 2018).

#### 4.3.1 La Traslazione del corpo di San Matteo

Il sei maggio di ogni anno, la Cattedrale di San Matteo, festeggia la traslazione delle sante reliquie del santo patrono che nell'anno 954, secondo la tradizione, furono portate nella città di Salerno. Le *spolie* dell'Evangelista, morto in Etiopia, giunsero, intorno al V secolo, dopo svariate vicissitudini, nel Cilento nella *polis* greca Elea, denominata in epoca romana Velia<sup>6</sup>, e qui rimasero sepolte per molti anni sotto una lastra di marmo non lontano

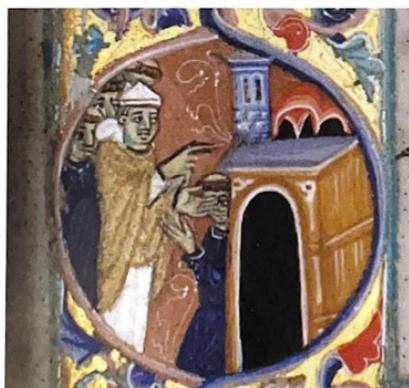


Fig. 58 - Alcune delle miniature che raffigurano la traslazione del Santo Matteo.

dalla zona delle terme.

Tra le varie storie e narrazioni che intrecciano elementi reali a pure invenzioni, uno degli episodi che la storiografia medievale ci ha tramandato sembra essere particolarmente affascinante: quello legato al rinvenimento delle *spolie* fino alla loro traslazione in città. Secondo le dodici significative illustrazioni, all'interno del *Traslazio sancti Mathei*, la leggenda narra che ad una donna di nome Pelagia che viveva a Velia, apparisse in sogno san Matteo e che a lei il santo indicasse il luogo della sua sepoltura (Fig. 58). Non soltanto la donna sognò il santo ma anche suo figlio, il monaco Atanasio, il quale recuperò, nascosto in un rudere poco lontano dalla loro abitazione, il corpo dell'apostolo. Sempre secondo la tradizione, il monaco nascose le reliquie in una nella cappella *ad duo flumina* nei pressi di Casalvelino ove, all'interno della chiesetta, è tuttora presente una lapide a testimonianza dell'evento della traslazione corpo da Casalvelino a Salerno. Apprese la notizia del ritrovamento del corpo, il vescovo Giovanni, presule della santa sede pestana, prelevò le spoglie e lo depose in un'arca sigillata dall'impronta del suo anello. Ma il monaco Atanasio, accecato dal desiderio di lucro, tentò di entrare all'interno della cappella di trafugare le sacre *spolie*. Per fortuna, il tentativo fallì e poco dopo iniziò il trasporto delle reliquie verso la cattedrale di Capaccio. Intanto la straordinaria notizia del rinvenimento giunse anche a Salerno che era governata dal principe longobardo Gisulfo I. Il vescovo di Salerno, Bernardo II, precipitatosi a Capaccio ordinò che il corpo fosse trasportato a Salerno sia per donargli un'adeguata sepoltura e sia per metterlo in sicurezza e preservarlo delle innumerevoli incursioni saracene presenti in quelle zone. Così, le reliquie giunsero in città, accolte dal clero e dal popolo con un grande corteo e nascoste nell'antica chiesa di Santa Maria degli Angeli, ove fu in seguito eretta la Cattedrale dedicata al santo patrono<sup>7</sup> (Braca, 2018).

#### 4.3.2 Vicende storiche nel tempo

Il 18 settembre 1080, il papa Gregorio VII scriveva ad Alfano I, arcivescovo di Salerno e monaco benedettino, una lettera di gioia<sup>7</sup> per il rinvenimento delle reliquie dell'apostolo Matteo. Il pontefice esortava nell'epistola, dopo ampie felicitazioni per tale scoperta, il Guiscardo e sua moglie, la principessa Sichelgaita (Apicella, 2009) *“a mostrarsi degni di un così insigne*

*patrono, che si era degnato di mostrarsi ad essi, e a procurare, con l'impegno di una grandissima devozione, di meritare per sé e per il popolo la sua grazia e il suo aiuto”*<sup>7</sup>.

La scoperta, quindi, delle reliquie, di uno dei più importanti santi della chiesa cristiana, ebbe delle ripercussioni anche sulla qualità del progetto e le parole del papa sembravano delle precise indicazioni in questo senso. Ma il condottiero normanno non aveva bisogno di una tale esortazione, consapevole del ruolo e del prestigio che assumeva costruendo la dimora del santo: la cattedrale veniva considerata come monumento perenne del valore del Duca e delle ardite conquiste normanne. Questo straordinario evento fu fruttuoso per il Guiscardo che sfruttò, a sua volta, la situazione mutando il significato della fondazione per proclamare al popolo il suo ruolo di *“massimo trionfatore dell'impero romano”* così come risalta dall'epigrafe lungo la fascia di marmo, alla base del timpano, della facciata principale del Duomo<sup>9</sup>. La storia narra che i coniugi normanni assistettero con impegno e devozione ai lavori dell'erigenda chiesa, edificata tra il 1080 ed il 1084, poiché volevano ingraziarsi l'animo dell'amico Alfano I. L'imponente fabbrica, finanziata dal principe normanno e costruita secondo lo stile del monastero di Montecassino, era visibile da qualsiasi punto della città e sorgeva nello stesso luogo in cui si trovava la vecchia basilica di Santa Maria degli Angeli e la piccola chiesa di san Giovanni Battista. Sebbene manchino i documenti e le fasi della sua costruzione, la tradizione ne fa architetto l'arcivescovo Alfano I, figura che gioca un ruolo fondamentale nella storia salernitana e nella letteratura del XI secolo.

Pertanto, ispirandosi alla basilica di Montecassino, costruita dall'abate Desiderio nel 1071, Alfano I concepì la Cattedrale, di puro stile romanico, con motivi e ornamenti arabi e bizantini, raddoppiandone però le dimensioni con espedienti tecnici ed economici. Fece giungere a Salerno, da tutto il regno, le più importanti maestranze restando, al contempo, le antiche *spolia* romane dalle aree archeologiche di Paestum e Pozzuoli e nei dintorni del complesso religioso (Fig. 59). La costruzione della cattedrale vide anche la piena partecipazione dell'intera comunità così come attestato da uno dei documenti più significativi del *Chronicon Salernitanum* (Carucci, 1988). Per la magnificenza dell'opera fu richiesto maggiore spazio e per tale motivo alcuni patrizi salernitani donarono gran parte dei terreni circostanti. Tra questi si distinse la famiglia de Ruggero che onorò così il suo casato<sup>10</sup>. L'area in cui sorgeva il Duomo racchiudeva i principali ricordi della storia religiosa, artistica e

Reimpiego dell'antico a Salerno  
I complessi monumentali e religiosi con le antiche spolia

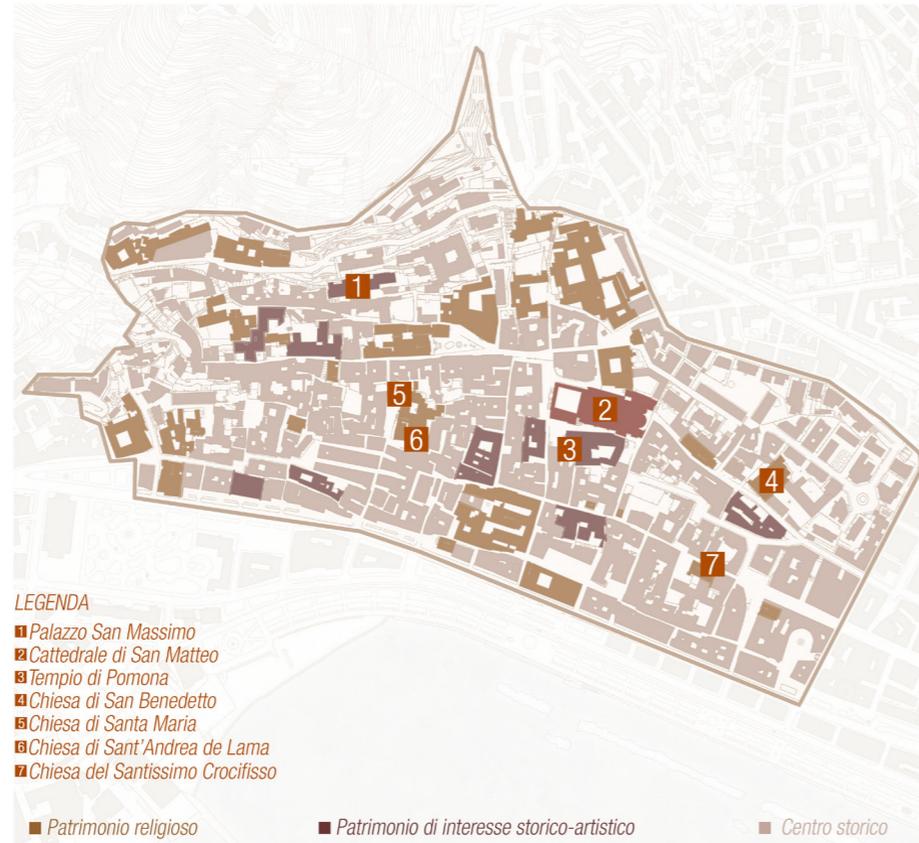


Fig. 59 - Il riuso del Centro storico di Salerno.

politica della città in età normanna. In realtà la scelta del suolo non fu solo occasionale ma corrispondeva ad almeno due precise esigenze in rapporto sia alla collocazione del terreno sia alla morfologia del luogo. La Cattedrale, con le sue imponenti dimensioni, sanciva sul territorio la nuova crescita della città normanna che andava estendendosi verso oriente, nella zona detta *Hortus Magnus*. Fino a quel tempo, le più significative trasformazioni urbane di *Salernum*, fondata nel 194 a.C. come colonia marittima romana, si erano avute in epoca longobarda quando la città divenne il centro più fiorente del Mezzogiorno e si sviluppava lungo tre direzioni principali: *Plaium Montis* a nord, l'*Hortus Magnus* ad est mentre la fascia costiera a sud era nota come *Inter merum et muricinum*. Il punto centrale della città era costituito dal *Palatium*, o reggia di Arechi II, che si inseriva in posizione baricentrica nel tessuto urbano circondato dalla lunga cinta muraria che correva fino a raggiungere il *castrum* longobardo posto sul monte Bonadies<sup>11</sup>. Pertanto, in questo periodo, veniva a definirsi la nuova immagine della città di Salerno, sovrastata, da un lato, dal castello,

baluardo di difesa, e dall'altro dalla cattedrale, baluardo di fede. Questi due monumenti, castello e cattedrale, costituiscono ancora oggi, i punti predominanti della città (Amarotta, 1989; Franciulli, 1993; Cifarelli, 1995). La zona per l'edificazione della Cattedrale aveva una seconda esigenza di carattere morfologico. L'area prescelta era l'unica in una posizione rialzata ad avere una grossa area livellata. Tale motivo, consentiva non solo di avere la cattedrale ben visibile dal mare e dal resto della città ma anche perché la morfologia del luogo si prestava alla realizzazione dell'innovativo espediente tecnico con la costruzione della cripta con una vasta aula triabsidata. Pertanto, per codesti motivi, l'area di edificazione si trovava ad essere delimitata ad oriente e occidente da due avvallamenti del terreno, corrispondenti alle attuali via Duomo e via Genovesi ed essere rialzata verso mezzogiorno di alcuni metri rispetto al piano di calpestio, oggi via Roberto il Guiscardo. Dopo solo sei mesi dal ritrovamento del corpo di San Matteo, nel marzo del 1081 i lavori di costruzione della Cripta furono portati a termine così come dimostrano le epigrafi delle lastre marmoree che coprono le tombe dei ss. Martiri salernitani, di san Matteo e di altri santi<sup>12</sup>. Questo spazio, ad aula triabsidata, presentava uno stile unico nel suo genere. La volta sovrastante le colonne di basalto delle navate era divisa in stelloni abilmente decorati a mano mentre le pareti laterali erano mirabilmente affrescate. Nel muro orientale furono aperte tre absidi e in quella centrale fu eretto l'altare per i santi Caio, Ante e Fortunato. Invece nel nucleo centrale della Cripta fu eretto l'altare, al di sotto del quale furono deposte le reliquie del santo e tale spazio costituì il primo nucleo nella costruzione del Duomo. Con stile puramente romanico e con motivi arabi e bizantini, i lavori proseguirono procedendo con l'edificazione della basilica superiore che fu edificata, come di consuetudine nei cantieri religiosi di epoca medievale, con orientamento est-ovest e a forma di croce latina. Tre navate, sostenute da colonne di granito, con un luminoso matroneo e con un ampio transetto, corrispondente all'ambiente ipogeo (Carucci, 1996). L'ultimazione dei lavori della chiesa terminò come si evince dall'epigrafe in facciata nel 1084 e nell'estate di quell'anno, la Cattedrale fu consacrata dal papa benedettino Gregorio VII in persona circondato da numerosi esponenti del clero, dal popolo e dal Guiscardo che acclamava all'unisono il simbolo della nuova Chiesa e del nuovo potere (Fig.60). L'anno successivo, a distanza di pochi mesi, si spensero Gregorio VII, Roberto ed Alfano I, e i lavori non erano ancora del tutto terminati. Solo nel secolo successivo furono completati l'ampio atrio, detto Quadriportico, il monumentale campanile in stile arabo-normanno e l'alta facciata, innalzata su un livello superiore rispetto la quota di calpestio, ebbe una larga scalinata monumentale

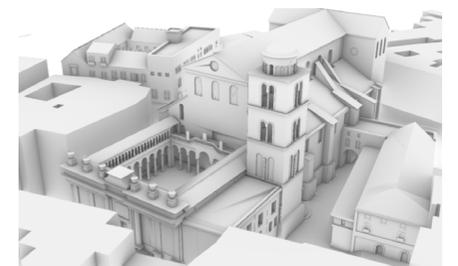


Fig. 60 -Vista esterna della Cattedrale da Via Roberto il Guiscardo..

con gradini di marmo a forma circolare e il portale d'ingresso. Ai lati della portale, detto *Porta dei Leoni*, furono collocati due statue ai lati degli stipiti, raffiguranti un leone e una leonessa con un leoncino, simboli della Chiesa e della Carità. Sull'architrave, scolpita ad imitazione di un portale romano, una scritta ricorda a chi entra l'alleanza tra i principati di Salerno e di Capua<sup>13</sup>. Il fregio, raffigurante una pianta di vite, presenta altre decorazioni animali: è evidente ancora una volta un chiaro riferimento alle simbologie paleocristiane. Tanta magnificenza non durò a lungo (Pace 1990). Da quel momento in poi, per la città ebbe inizio un periodo di declino e decadenza, durante il quale l'incuria del tempo e dell'uomo resero cadente il massimo monumento dell'architettura normanna.

All'inizio del XVII, furono eseguiti dall'architetto Carlo Buratti<sup>14</sup>, su incarico dell'arcivescovo Poerio<sup>15</sup>, nuovo arcivescovo di Salerno, i primi lavori di restauro che trasformarono la Cattedrale in completo stile barocco, eliminando quasi del tutto gli originari elementi romanici e l'assetto medievale (Schiavo, 1973). Purtroppo, questi interventi di ristrutturazione e consolidamento compromisero ancor di più i problemi di natura statica del Duomo, a causa della pesantezza delle nuove strutture. Difatti, nel progetto di Buratti le antiche colonne furono inglobate in robusti pilastri mentre sui lati furono edificate nuove cappelle. Ulteriori lavori continuarono poi a protrarsi nel corso del secolo e tra questi ricordiamo le trasformazioni che furono eseguite nel Quadriportico, in modo particolare sul lato del nartece, e sulla facciata dell'ingresso corrispondente all'attuale aspetto.

Solo agli inizi del 1929 e, solo in seguito al terremoto del 1931, sotto la supervisione dell'allora soprintendente Gino Chierici i restauri, a cura di Monsignor Monterisi, comportarono la rimozione degli stucchi barocchi. Intanto, i bombardamenti del secondo conflitto bellico, richiesero nuove e radicali opere di intervento che riportarono, finalmente, per volere di Monsignor Moscato, alla luce le strutture originarie e la bellezza dello stile romanico<sup>16</sup>.

#### **4.3.3 Montecassino e Salerno. Due edifici religiosi a confronto: affinità costruttive e considerazioni critiche tra i due manufatti**

I pochi anni che intercorsero fra l'edificazione delle due Cattedrali di Montecassino e di Salerno ci forniscono elementi utili per definire l'affinità esi-

stente tra i due edifici religiosi. Difatti, nel Duomo di San Matteo non sono pochi gli elementi e gli aspetti che si possono considerare di derivazione cassinese tanto che Gino Chierici, nel suo articolo "il Duomo di Salerno e la Chiesa di Montecassino" (Rassegna Storica Salernitana, Anno I, numero I) enunciò: "Fra l'uno e l'altro edificio vi era un'affinità così stretta, da poter essere quasi una vera e propria identità"<sup>17</sup>.

La costruzione dell'Abbazia di Montecassino terminò il 1°ottobre del 1071 quando, dinanzi alla presenza dei più alti dignitari del potere religioso e politico dell'Italia centro meridionale, veniva consacrata in presenza di papa Alessandro II. I lavori erano stati avviati cinque anni prima dall'abate Desiderio, figlio del principe longobardo Landolfo di Benevento, che costituì una delle figure principali del panorama artistico e architettonico della metà dell'XI secolo, in quanto per l'età romanica egli incarnava pienamente la figura dell'abate costruttore e patrono dell'architettura e dell'arte. Inoltre, da quel momento in poi, Montecassino costituiva il principale fulcro della politica papale e normanna nel Centro-meridione; Purtroppo, la conformazione architettonica dell'abbazia desideriana andò in parte perduta a causa sia dei continui terremoti che colpirono l'area sia a causa dei bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale. Una lettura generica dell'edificio è riconducibile grazie ai rilievi elaborati da Antonio da Sangallo il Giovane ed il fratello Battista che offrono un quadro complessivo di come si presentava la pianta della chiesa dell'abbazia medievale nella prima metà del Cinquecento. Invece, le ricerche sulle prime fasi di vita del monastero sono note grazie agli scavi effettuati in seguito al bombardamento dell'Abbazia del febbraio (Aceto, 1997). Si è riusciti, con il magistrale lavoro dell'abate di Montecassino Ildefonso Rea da Arpino a definirne una storia costruttiva suddivisa in tre periodi: il primo relativo alla fondazione di San Benedetto nel 529, un secondo relativo all'epoca altomedievale con gli interventi dell'Abate Gisulfo ed infine, un terzo periodo, di età romanica coincidente con i lavori dell'abate Desiderio, le cui caratteristiche furono delucidate poi da Giovanni Carbonara<sup>18</sup>.

L'edificio desideriano – il cui aspetto finale è noto grazie alla descrizione puntuale fornita da Leone Ostiense nella *Chronaca*<sup>19</sup> - aveva una pianta di tipo basilicale orientata ad est ed articolata in tre navate con dieci colonne per parte ed un transetto triabsidato. Dinanzi la chiesa si ergeva un quadriportico con torri sul braccio orientale mentre l'intero complesso era circondato da numerosi ambienti che andavano a definirne il carattere monumentale arricchito da elementi di spolia, provenienti da Roma e magnifici

mosaici bizantini che raffiguravano il Vecchio e Nuovo Testamento. Inoltre, la cattedrale traeva ispirazione, come si evince, dai modelli delle basiliche romane di tradizione paleocristiana ad un modello architettonico già molto diffuso nel mondo latino – il modello basilicale - ha voluto inserire diverse espressioni artistiche al fine di dargli un carattere nuovo. mentre i lavori, come dice il Bottari nella sua opera “Chiese basiliane della Calabria e della Sicilia” furono affidati alle migliori maestranze dell’epoca, provenienti dal contesto lombardo ed amalfitano, da Costantinopoli, dalla Grecia e dal mondo islamico: questo carattere multiculturale di Montecassino favorì la nascita e lo sviluppo di una vera e propria scuola per la formazione delle maestranze e dei giovani apprendisti e garantì a Desiderio di acquisire presso i suoi contemporanei l’epiteto di un “alter Solomon”. Sicuramente, l’anello di congiunzione tra le due cattedrali fu rappresentato da Alfano I che fu grande amico dell’abate Desiderio ed entrambi, furono molto vicini al papa Vittore II<sup>20</sup>. Il clima di rinascita culturale influisce anche sulle scelte stilistiche orientate verso il revival dell’antico. Classicismo e cultura della “*renovatio ecclesie*”<sup>20</sup> costituiscono il binomio di fondo che animarono entrambi i progetti. Inoltre, l’arcivescovo salernitano era frequentatore dell’abbazia cassinese per la quale elaborò i versi dei *tituli* che accompagnavano le decorazioni sulle pareti e tali soggiorni gli furono molto utili quando iniziarono i lavori della Cattedrale a Salerno.

Come l’edificio cassinese anche il Duomo di Salerno presenta il medesimo sviluppo planimetrico. Il suo impianto architettonico si articolava per l’appunto in tre navate, transetto e un quadriportico. Ma un’analisi più attenta e approfondita degli spazi interni rivela evidenti incongruenze tra le due planimetrie dei due edifici. In tale contesto la cattedrale salernitana, nonostante la tradizionale forma tipica dell’architettura romanica, si colloca nel panorama culturale ed architettonico come elemento di assoluta novità. La prima novità è rappresentata dalla Cripta, ampia e a tre absidi, appartenente al tipo architettonico detto ad aula (Carucci and Pecoraro, 1997). Questa tipologia, meglio nota nel nord Europa e nell’Italia settentrionale, rappresentava un elemento di assoluta novità nell’Italia centro-meridionale tant’è che, sull’esempio dell’ambiente ipogeo di San Matteo, si costruiranno nel giro di pochi anni, le cripte di Ravello, Otranto e Sant’Agata dei Goti.

Dall’analisi dei rapporti spaziali interni, le similitudini tra le due cattedrali tendono a cessare. In modo particolare, nello sviluppo planimetrico della cattedrale di San Matteo si può riscontrare uno sviluppo armonico tra l’edificio e le singole parti (Braca, 1997). Sulla corrispondenza armonica,

riscontrabile tra le singole parti, mediante le metodologie di rilievo eseguite all’interno del Duomo, con tecnologie no-contact (ved. cap. V), sono state verificate le ipotesi avanzate da Gino Chierici (Chierici, 1937) e quelle più recenti dello studioso Antonio Braca e degli architetti Vincenzo Sebastiano e Maria Cristina Cioffi<sup>21</sup>.

In seguito alle operazioni di rilievo si può desumere che:

- L’abside maggiore, a sesto eccedente, è il doppio delle due absidi laterali sia in profondità che in larghezza;
- Le absidi e le navate, anche se non perfettamente allineate, sono abbastanza corrispondenti;
- La lunghezza del transetto risulta uguale a 15,80 metri mentre quella della basilica corrisponde a 79 metri, uguale esattamente a cinque bracci della crociera, di cui due parti sono collocate all’estremità in corrispondenza dell’ingresso e della volta dell’abside;
- La larghezza della chiesa è di circa 32 metri e corrisponde a circa il doppio del transetto così come l’altezza di 27,70 metri presenta un rapporto modulare, uguale a 7.90 metri.

### 5.1 L'ambiente ipogeo: La Cripta del santo Matteo dal Medioevo ad oggi

Come già precedentemente riportato, l'ambiente ipogeo della Cripta fu il primo corpo nella costruzione della Cattedrale ad essere edificato e fin dalla sua costruzione, custodisce le reliquie dell'evangelista Matteo che, secondo la leggenda della traslazione, nel X secolo furono trasportate da Capaccio a Salerno dal principe Gisulfo I.

Lo spazio interno è stato concepito, fin dal progetto originario, intorno al sepolcro del santo patrono, simbolo della città, che rappresenta il *Sancta Sanctorum* intorno al quale ruotano tutti gli altri elementi. Il primo elemento di assoluta novità era dato dalla forma della cripta ad aula triabsidata, corrispondente al transetto della basilica superiore, ma leggermente più stretta per consentire una maggiore base d'appoggio. Due filari di colonne in granito, oltre ad avere una funzione di sostegno insieme ad altre poste ai lati per supportare lo spazio sovrastante, tripartivano l'ambiente interno al quale si poteva accedere mediante le due scale, una posta sulla navata di destra ed una posta sulla navata di sinistra, della basilica superiore. Un terzo ingresso esterno, invece, fu aperto sull'attuale via Roberto il Guiscardo, durante i lavori di restauro che interessarono, nel 1877, la pavimentazione della basilica superiore. Dopo questi lavori, l'ingresso fu chiuso, per poi essere riaperto definitivamente nel 1916, durante la Prima Guerra Mondiale, quando la cripta fu utilizzata come rifugio antiaereo.

Sono poche le fonti storiche che ci riportano la configurazione architettonica in epoca medievale. Le più significative sono quelle di monsignor Colonna secondo il quale il sepolcro di San Matteo era circondato da pareti lapidee e cancelli di ferro. Si trattava di una vera e propria cappella il cui ingresso avveniva da occidente e dunque, dal lato delle scale, mentre l'altare del santo era disposto in corrispondenza dell'abside maggiore<sup>22</sup>. Questa conformazione spaziale mutò completamente nel periodo barocco e da quel momento in poi, il succorpo ha perduto definitivamente lo stile originario (Fig. 61).

Tali trasformazioni si ebbero, in modo particolare, tra il 1600 e 1640 quando il vicerè di Napoli Fernando Ruiz de Castro VI, per volere dei reali di Spagna che volevano manifestare la loro devozione al santo, finanziò l'intervento che fu realizzato in pieno stile barocco. I lavori furono eseguiti dagli architetti Domenico Fontana e suo figlio Giulio Cesare che, in quegli anni, si occuparono di restaurare anche la cripta di Sant'Andrea nel Duomo di Amalfi (Gandolfo, 1992). Gli interventi che trasformarono la cripta salernitana, rendendola unica nel suo genere secondo il gusto barocco, furono descritti dallo stesso Fontana<sup>24</sup> e si conclusero, come riportato nella lapide, oggi conservata nelle scale settentrionali, nel 1616 ma, in realtà, proseguirono fino al 1640<sup>23</sup>.

I primi lavori di cui si occuparono gli architetti Fontana riguardarono la tomba di San Matteo. Per tale realizzazione fu progettato un doppio altare bifronte con una doppia statua dell'apostolo, che divideva lo spazio della Cripta in due parti uguali.

Questo altare, *dalla forma rara e inusuale*<sup>24</sup>, che ancora oggi stupisce il visitatore, fu innalzato sul sepolcro del santo, collocato a circa due metri di profondità. Pertanto, in codesta occasione, come descritto dall'architetto Fontana<sup>25</sup>, l'altare, che inizialmente era unico, venne ruotato rispetto la sua originaria collocazione e posizionato di traverso. In tal modo, chiunque accedeva alla Cripta della due scale laterali, poteva ammirare le due statue da ogni angolazione. Visto che la committenza dell'opera era molto prestigiosa anche il livello del progetto fu molto dettagliato nella fase della decorazione. I due altari, ricchi di marmo, furono sormontati da una maestosa edicola. Quest'edicola è composta da un doppio ordine di pilastri a cui sono addossati quattro colonne di breccia verde, con basi e capitelli, di ordine corinzio, in marmo bianco. Tali colonne sorreggono una trabeazione con timpano spezzato all'interno del quale sono posti due

puttini che reggono lo stemma dei reali spagnoli. L'autore fu lo scultore napoletano Francesco Cassano, che insieme ad altri scultori, quali Angelo Landi e Raymo Bergantino, si occupò anche dell'acquisto dei marmi. Nel 1606, al centro dell'edicola, furono poste le due statue gemelle in bronzo, raffiguranti il santo e realizzate dallo scultore fiorentino Michelangelo Naccarino<sup>26</sup>. Queste due statue costituiscono, certamente, il massimo esempio di cultura tardomanierista (Fig 62). Infine, tutta la costruzione fu poi delimitata da una balaustra in marmo, costituita da una serie di colonnine, munita di due aperture poste in corrispondenza degli altari ed ornata agli angoli con quattro candelabri in ottone che furono donati dalla Scuola Medica Salernitana. Invece, in una piccola celletta, sita più in alto del sepolcro, è racchiusa la scatola in cui si raccoglieva quella che la devozione popolare chiamò la "Manna di San Matteo". Oggi, la tomba di San Matteo è visibile da una piccolissima finestra circolare ed è possibile accedere al livello sottostante, mediante una scala, a doppia rampa, posta ad ovest della Cripta, aperta solo durante i lavori di restauro nel dopoguerra.

In codesto periodo, le pareti della cripta furono completamente rivestite in marmi colorati, intarsiati con volute fiorite e cornucopie (Fig 63). Queste elegantissime decorazioni, tuttora ammirabili, coprono con differenti motivi floreali ogni spazio delle singole campate, delimitate da semi pilastri anch'essi ricoperti di lastre in marmo. Inoltre, al centro di alcune campate, la decorazione ruota intorno ad un alveo ove, in posizione centrale, è inserito un mezzobusto marmoreo, raffigurante uno dei vescovi salernitani onorati. In totale sono dieci: sei posti lungo la parete occidentale con le statue di san Vero, san Valentiano, san Guadenzio, san Austerio, san Alfano; due posti sul lato settentrionale con le statue di san Eusterio e san Grammazio ed infine sulle pareti tra le absidi della zona est ritroviamo i busti di san Giovanni e san Bonosio. Tutte, eccetto la statua di San Giovanni Battista<sup>26</sup> del XVI secolo, furono realizzate dallo scultore Francesco Ragazzino nel 1759 e donate dalla Scuola Medica Salernitana. In quest'opera di ingenti trasformazioni anche le colonne di granito, che sostenevano l'antica volta romanica e dividevano lo spazio in tre navate, furono rivestite con pannelli di marmo intarsiati in diversi colori (Fig 64). In corrispondenza delle tre absidi orientali troviamo, invece, tre cappelle. La cappella centrale, di dimensioni maggiori rispetto alle laterali, è dedicata ai *santi martiri salernitani* che subirono il martirio all'epoca della violenta persecuzione eseguita dall'imperatore romano Diocleziano ai danni dei cristiani nel 303.d.C.<sup>27</sup>; La loro tomba, posta al centro della cappella, è visibile attraverso una grata



Fig. 61 – L'ambiente ipogeo della Cattedrale di San Matteo: la Cripta.

mentre sul lato di sinistra è posta una bassa colonna strigilata, sulla quale, secondo la tradizione, i martiri furono decapitati. Le altre due cappelle minori non sono meno suggestive: la prima custodisce le spoglie delle sante sorelle di San Prisco che, ritrovate da Alfano I nel Medioevo, furono ivi risistemate; La seconda cappella minore, detta del Santissimo, ospita la sagrestia della cripta.

A nord, in corrispondenza delle scale che portano all'altare di San Matteo, troviamo la cappella, detta dei "Vescovi Santi", che accoglie le reliquie dei primi vescovi santi salernitani custodite in urne, di legno e cristallo, su ognuna delle quali è riportato il nome del vescovo defunto. La più grande, collocata al centro della zona, è quella di san Bonosio, primo vescovo salernitano, la cui statua primeggia anche sul lato del nartece dell'ampio atrio esterno.

### 5.1.1 La volta e gli affreschi di Belisario Corenzio

A titolo esemplificativo, vista la magnificenza del luogo, viene riportato un focus descrittivo sugli affreschi di Belisario Corenzio<sup>28</sup> che si occupò delle decorazioni pittoriche delle volte della Cripta. Tali decorazioni, interamente coperte da stucchi in oro ed affreschi distribuiti in trentasei riquadri ovali e ottagonali, donano nel complesso un caleidoscopio di colori all'ambiente ipogeo. I dipinti raffigurano le scene dei Vangeli della vita di Gesù, dall'An-nunciazione a Maria, all'Infanzia e alla Vita Pubblica e nessuna raffigurazione, tra quelli presenti, fa riferimento al ciclo della Passione e della Resurrezione. Difatti, il ciclo termina, come illustrato nell'ovale 36 con l'Ingresso in Gerusalemme di Gesù. Il pittore Corenzio portò a compimento l'opera nel 1611, probabilmente con l'aiuto dei suoi collaboratori, occupandosi non solo della volta dell'aula ma estendendo l'apparato decorativo anche nell'abside centrale ove la Scuola Medica Salernitana celebrava le funzioni religiose. Gli affreschi, in codesto spazio, illustrano tre spaccati di storia della città, intrecciando, seppur in momenti distinti e distanti temporalmente, eventi di vita religiosa e civile. I primi riquadri, a partire da destra, illustrano il martirio dei tre santi, Caio, Ante e Fortunato; Il secondo, a sinistra, raffigura la morte dell'emiro Abdullha, che aveva profanato la chiesa dedicata ai santi Martiri fuori le mura, trasformandola a sua dimora; il terzo ciclo illustra alcuni episodi dell'assedio della città nell'871 ad opera dei Saraceni con l'eroica sortita delle truppe salernitane che riuscirono a liberare



Fig. 62 - L'altare di San Matteo all'interno della Cripta.

la città; A chiudere il ciclo agiografico sono gli affreschi posti ai lati del

finestrone che rappresentano, a partire da destra, il ritrovamento del corpo di San Matteo fino alla traslazione delle reliquie nella Cattedrale di Salerno (Fig. 65).

## 5.2 La Basilica superiore

Come era consuetudine nei cantieri medievali, dopo la costruzione del corpo ipogeo si passò alla realizzazione della basilica superiore, i cui lavori terminarono nel 1084. La maestosa cattedrale che oggi ammiriamo è il frutto di diversi interventi di restauro che si sono susseguiti nel tempo. Questo è il motivo per il quale l'interno è caratterizzato da una forma di bilinguismo culturale che unisce all'antica struttura medievale opere barocche o neoclassiche. Per accedere al Duomo è necessario attraversare l'ampio Quadriportico sul cui lato del nartece si aprono tre portali, di età normanna, che contrassegnano gli ingressi, in corrispondenza delle navate. L'impianto, esemplato sul modello dell'abbazia di Montecassino, ha la forma di croce latina il cui corpo longitudinale, lungo circa 83 metri, è scandito dalla presenza di tre navate divise da due filari di undici pilastri per parte. Un tempo l'intero edificio poggiava su colonne di granito inglobate, successivamente, in pilastri in muratura. Alcune di queste sono state messe in evidenza durante i lavori del dopoguerra così come i ricchi mosaici che riaffiorarono al di sotto delle strutture barocche (Fig. 66).

### 5.2.1 La Navata centrale e il coro ligneo

Nella parte terminale della navata centrale, caratterizzata da una volta a botte ribassata con lunette a teste di padiglione, interamente affrescata di bianco con stucchi in rilievo, si inserisce un coro, delimitato da due amboni, posti uno di fronte all'altro, sorretti da colonnine bizantine decorate con un intarsio di pietre policrome. Essi sono, rispettivamente, l'ambone Guarna del 1180, posto a sinistra di chi entra, che veniva utilizzato come canto dell'Epistola e sulla destra l'ambone D'Aiello del 1205 che, invece, serviva per il canto del Vangelo<sup>29</sup>. Il primo ambone fu donato, come è riportato sull'iscrizione che corre lun-



Fig. 63 - Decorazioni della Cripta.

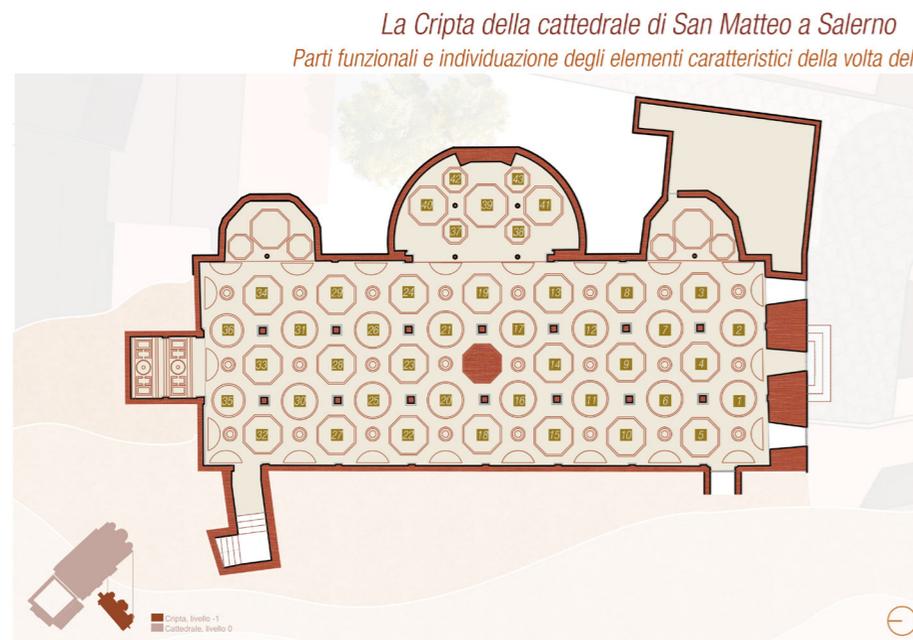


Fig. 64 - Le absidi dell'ambiente ipogeo.

go il parapetto, da Romualdo Guarna, arcivescovo a Salerno dal 1163 al 1180<sup>30</sup>. Questo ambone, di forma quadrata con archi ribassati, è sorretto da quattro preziosissime colonne, alte circa 1.90 metri, di granito e porfido, tre delle quali sormontate da capitelli figuranti mentre la quarta presenta un capitello con motivi vegetali. Al particolare pregio delle sculture si affianca sui parapetti una minuziosa decorazione musiva che “*si fonda sul ripetersi e sul complicarsi del modulo di ispirazione bizantina del disco inscritto in una fascia a motivi geometrici sempre diversi*” (Carucci, 1962).

Il secondo ambone, sulla destra, fu invece donato dalla famiglia dell'arcivescovo Niccolò D'Aiello, figlio dell'ultimo cancelliere dei Normanni. Sebbene l'attribuzione sia incerta, appare evidente l'affinità stilistica con l'ambone di fronte che fa ipotizzare una contemporaneità di esecuzione nella seconda metà del XII secolo. L'ambone, a pianta rettangolare, è sostenuto da dodici colonne di granito lisce, simboleggianti i dodici apostoli, con capitelli decorati con motivi naturalistici mentre l'architrave è di ordine romanico. Addossato all'ambone, si eleva una colonna, alta anch'essa 5 metri, che serve per il cero pasquale. Sostenuta alla base da quattro leoni, è ricca di mosaici suddivisi in tre fasce mentre, nella parte alta, un gruppo marmoreo di puttini danzanti reggono l'innesto del Cereo. I parapetti di incantevole decorazione, invece, riportano i pannelli a mosaico molto simili all'ambone d'Aiello.

Fig. 65 – Descrizione degli affreschi dell'artista Belisario Corenzio.



- CRIPTA**
1. Annunciazione
  2. Visitazione
  3. Natività, Adorazione dei pastori
  4. Circoncisione
  5. Adorazione dei magi
  6. Presentazione al tempio
  7. Fuga in Egitto
  8. Strage degli innocenti
  9. Gesù fra i dottori
  10. Battesimo di Gesù
  11. Gesù tentato dal demonio
  12. Nozze di Cana
  13. Cacciata dei mercanti dal tempio
  14. Vocazione di San Pietro e San' Andrea
  15. Gesù guarisce la suocera di Simone
  16. Vocazione di Matteo
  17. Convito in casa di Matteo
  18. Resurrezione del figlio della vedova di Nain
  19. La tempesta sedata
  20. Gesù guarisce un paralitico
  21. Gesù guarisce l'emorroissa
  22. La Samaritana al pozzo
  23. La peccatrice in casa di Simone
  24. Gesù resuscita la figlia di Giairo
  25. Moltiplicazione dei pani e dei pesci
  26. Gesù cammina sulle acque
  27. Guarigione dell'itropico
  28. La guarigione dello storpio a Betsaida
  29. Guarigione dell'epilettico
  30. L'adultera
  31. Guarigione del nato cieco
  32. Trasfigurazione
  33. Guarigione del cieco
  34. La cananea
  35. Resurrezione di Lazzaro
- ABSIDE CENTRALE**
36. Ingresso in Gerusalemme
  37. I ss. Martiri dinanzi al proconsole
  38. I ss. Martiri nel tempio di Priapo
  39. Decapitazione dei ss. Martiri
  40. Le aquile proteggono i corpi dei martiri dalle belve
  41. Apparizione di San Fortunato ad un cacciatore
  42. Abd-Allah muore nel crollo della Chiesa dei ss. Martiri
  43. I Salemitani sconfiggono i Saraceni
- LUNETTE LATERALI**  
Trasporto dei corpi dei martiri a Salerno  
\*Ciclo della volta della Cripta (da Carucci-Pecoraro)

Dopo i due amboni, si innesta il coro ligneo, lungo 15 metri e largo 14 metri che poggia sui mosaici pavimentali fatti realizzare dall'arcivescovo Romualdo Guarna nel 1170. I mosaici, disposti nell'area del coro, si compongono di una grossa fascia centrale e due grossi pannelli laterali; il loro andamento assecondava il percorso dei chierici verso l'altare posto al centro del Transetto. Lungo le pareti del coro ritroviamo gli stalli lignei donati dall'arcivescovo Seripando. L'attuale struttura non corrisponde a quella originaria. Difatti, come si apprende da alcune documentazioni, il coro si componeva di 46 stalli. Oggi, si contano 36 stalli superiori e 24 inferiori distribuiti simmetricamente su entrambi i lati. Su alcuni di questi sono scolpiti a rilievo, lo stemma dell'arcivescovo Seripando, lo stemma dei reali di Spagna e San Matteo con l'angelo. All'estremità sinistra del coro, prima del transetto, è collocato il trono marmoreo arcivescovile, che per volere

Fig. 66 – Descrizione planimetrica della Cattedrale di San Matteo.



- SCALONE e FACCIATA**
1. La Porta dei Leoni
- ATRIO**
- QUADRIPORTICO\_A**
2. Sarcofago dedicato ad Antonio Syrraca
  3. Sarcofago romano
  4. Sarcofago romano
  5. Sarcofago dedicato alla Famiglia Capagrasso
  6. Sarcofago dedicato alla Famiglia Capagrasso
  7. Sarcofago romano
  8. Sarcofago dei Buon Pastore
  9. Frammento pluteo altomedioevo
  10. Sarcofago dedicato a Giorgio Vicaris
  11. Sarcofago dedicato alla Famiglia Guarna
  12. Lastra dedicata a Nicolò Piscitelli
  13. Sarcofago dedicato a Guglielmo D'Altavilla
  14. Sarcofago dedicato alla Famiglia Ruggi
  15. Sarcofago dedicato a Benedetto Rotunno
  16. Sarcofago dedicato a Pontano D'Agostino
  17. Sarcofago dedicato a Marchisia del Balzo
  18. Sarcofago dedicato alla Famiglia Santomango
  19. La fontana
- CAMPANILE\_B**  
**SALA SAN TOMMASO\_C**
- BASILICA**
- NAVATA MERIDIONALE\_D**
20. Cappella - Mazza
  21. Cappella - De Vicaris
  22. Cappella - Paoletti
  23. Cappella - Santa Trinità o delle Reliquie
  24. Cappella - del Pezzo o del SS. Rosario
  25. Cappella - della Calce o Purificazione
  26. Sarcofago dedicato ad Antonio Salomone
  27. Sarcofago dedicato a Ruggero Borsa
  28. Sarcofago dedicato a Giacomo Capograsso
- NAVATA SETTENTRIONALE\_E**
29. Cappella - Fonte Battesimale
  30. Cappella - Congrega di San Giuseppe
  31. Cappella - Famiglia Pinto
  32. Cappella - Famiglia Lembo o Pentecoste
  33. Cappella - Santa Maria degli Angeli o Famiglia De Ruggiero
  34. Cappella - San Francesco di Paola
  35. Cappella - Monumento funebre di Margherita Durazzo
- NAVATA CENTRALE\_F**
36. Iconostasi
  37. Ambone Guarna
  38. Ambone D'Aiello
  39. Area del Coro e Coro ligneo
- TRANSETTO**
40. Altare Maggiore
  41. I mosaici della Parete absidale
  42. Le sculture romaniche
  43. Lastra tombale dei canonici
  44. Pluteo gotico con i santi
  45. Monumento funebre Piscitelli
  46. Tritico del XVI secolo
  47. Monumento funebre D'Aprano
  48. Abside minore settentrionale
  49. Monumento funebre Vilana Perlas
  50. Monumento funebre Sanchez de Luna
  51. Trono vescovile mons. Sorgente
  52. Pulitino Carafa
  53. Abside maggiore
  54. Monumento funebre Paglia
  55. Monumento funebre Carafa
  56. Abside minore meridionale
  57. Lapide Martiri per il porto
  58. Sepolcro Santomango
  59. Sarcofago Trionfo di Bacco
  60. Sacrestia

di papa Gregorio VII, ha sette gradini quanti sono quelli del trono papale. Invece, al lato opposto della navata, nella zona d'ingresso, nella lunetta soprastante la "Porta di Bronzo" è conservato un grande mosaico raffigurante san Matteo che costituisce la così detta controfacciata della basilica (Fig. 67).



Fig. 67 – La navata centrale e il coro ligneo.

### 5.2.2 La Navata meridionale<sup>31</sup>

In origine al posto delle cappelle disposte lungo la navata meridionale della Basilica vi era un lungo corridoio meglio noto come Terra Santa. Dopo il violento terremoto del 1688<sup>32</sup> che colpì la città di Salerno anche il Duomo subì notevoli danni (Cielo, 1980; Nappi, 1981; Amirante, 1987). Proprio in questa occasione al posto del corridoio cimiteriale furono realizzate sei nuove cappelle che, con le robuste fondamenta, avevano funzione strutturale. Esse erano perfettamente allineate e corrispondenti, anche nelle dimensioni, a quelle della navata settentrionale in rispetto alle regole di simmetria scelte dall'architetto Carlo Buratti il cui progetto stravolse l'assetto medievale (Schiavo, 1995) (Fig. 68).

#### I: Cappella Mazza o Cappella di San Gennaro

Questa cappella in origine costituiva il vano attraverso il quale si accedeva al corridoio della Terra Santa da un lato mentre dall'altro era posto l'ingresso per accedere alla scala che conduceva dall'interno al loggiato superiore del Quadriportico e al Campanile. Dopo le trasformazioni, la cappella fu acquistata dalla famiglia Mazza e il progetto fu affidato all'architetto Ferdinando Sanfelice mentre la conca e l'altare marmoreo fu commissionato, inizialmente al marmorario Virgilio Ognà e poi, alla morte di quest'ultimo, furono realizzati da Domenico Guarino. Molto prezioso è il dipinto, collocato sull'altare e raffigurante San Gennaro, opera di Francesco Solimena (Fig. 69).

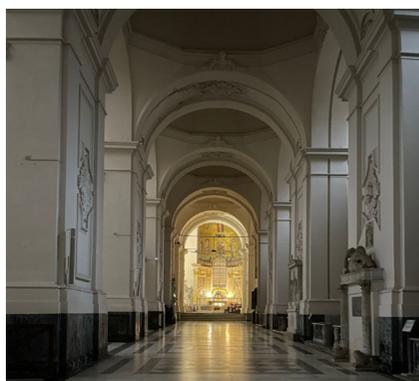


Fig. 68 – La navata meridionale.

#### II: Cappella De Vicaris

La cappella successiva, inizialmente, era collocata nella navata settentrio-

nale. Essa, riassetata e ivi collocata, rappresenta uno dei pochi monumenti rinascimentali presenti a Salerno. Seppur profondamente modificato nel corso del 1800, oggi l'altare copre l'intera parete con la sua struttura in marmo. La parte di maggiore prestigio è la conca marmorea composta da una cornice decorata da fregi mentre in basso è posta una predella con pannelli scolpiti raffiguranti *La passione di Cristo*. Al di sopra dell'altare è posto il dipinto raffigurante *L'adorazione dei Magi* con *Sant'Elena*. Alle pareti delle cappelle si trovano le lapidi che descrivono le fasi storiche mentre sul pavimento è riportato lo stemma gentilizio (Fig. 70).



Fig. 70 – Cappella De Vicaris.

#### III: Cappella Poerio

La terza cappella fu realizzata nel 1716 dall'arcivescovo Bonaventura Poerio. Qui sono custoditi monumenti funebri di alcuni vescovi salernitani, quali Francesco de Capua e Valerio Laspro. Sulla balaustra marmorea sono posti gli stemmi del Poerio ed anche un ritratto in marmo, attribuito a Virgilio Ognà, che in quegli anni divenne il marmorario della curia. Anche questa cappella, fu oggetto di profonde trasformazioni avvenute agli inizi del 1807, ed oggi l'assetto risulta essere profondamente modificato (Fig. 71).



Fig. 71 – Cappella Poerio.

#### IV: Cappella SS. Trinità o delle Reliquie

In origine, tale cappella costituiva la sepoltura dei canonici del capitolo. In seguito alle trasformazioni settecentesche, l'ambiente, costruito ex novo, fu donato alla famiglia Granito che commissionò a Virginio Ognà una conca marmorea che negli anni Cinquanta del XX secolo fu trasformata in cappella delle Reliquie con la conseguente esposizione di parte dei reliquiari e di alcune sculture in argento. Tra i reliquiari, oltre a quello di S. Croce, insigni sono: la mano destra di San Tommaso d'Aquino e il braccio di San Matteo. Al di sotto dell'altare, in un'urna di cristallo, vi sono i resti della Badessa Lucia da Caltagirone. Sulla parete di sinistra si trova il monumento funebre in bronzo dell'arcivescovo Moscato (Fig. 72).



Fig. 72 – Cappella SS. Trinità.

#### V: Cappella del Pezzo o del SS. Rosario

La cappella del Pezzo inizialmente apparteneva alla famiglia Palearia ed era dedicata alla *Madonna del Rosario*. In ricordo dell'originaria destinazione

della cappella, sull'altare è posto un dipinto su tela ovale raffigurante la Madonna (Fig. 73).

#### *VI: Cappella della Calce o della Purificazione*

La sesta ed ultima cappella, posta sulla navata meridionale, fu fondata dall'arcivescovo Poerio per volere della famiglia Calce. Essa è nota anche come *cappella della Purificazione* per il soggetto della tela eseguita da Matteo Chiarelli nel XVIII secolo. L'altare, la cona e la balaustra, invece, furono realizzati da Giuseppe Bastelli mentre il pavimento in maiolica è conservato nella piccola sagrestia il cui accesso è posto sulla parete di destra (Fig. 74).



Fig. 73 – Cappella del Pezzo.

### 5.2.3 La Navata settentrionale

I lavori di restauro sul lato settentrionale della Cattedrale furono completati verso la fine del XVIII secolo con l'ultimazione delle sei cappelle, corrispondenti anche nelle misure a quelle presenti sul lato meridionale. Se queste ultime furono ricavate dal corridoio cimiteriale queste altre, invece, furono scavate nel terrapieno adiacente oggi l'attuale via Nicola Monterisi (Fig. 75).

#### *I: Cappella del Fonte battesimale*

La prima cappella che si incontra entrando dal Quadriportico, oggi, è destinata ad accogliere il nuovo fonte battesimale. Un tempo questo spazio apparteneva alla famiglia D'Ajello e poi, successivamente ai lavori di ristrutturazione settecentesca, la cappella fu dedicata a sant'Antonio di Padova. Questo piccolo spazio mutò nuovamente destinazione quando, nel 1825, il re di Napoli, Francesco di Borbone si appropriò dell'ampia vasca di granito posta al centro dell'atrio esterno. In quell'occasione, l'antico fonte battesimale, che era collocato all'ingresso della navata centrale, fu trasferito al posto della fontana. Pertanto, fu necessario realizzare per le funzioni liturgiche il nuovo fonte battesimale. L'opera fu commissionata allo scultore cavese Alfonso Balzico nel 1854 che realizzò una struttura marmorea di forma ottagonale che presenta nella parte bassa una piccola vasca mentre nella parte alta è posto il gruppo scultoreo raffigurante il

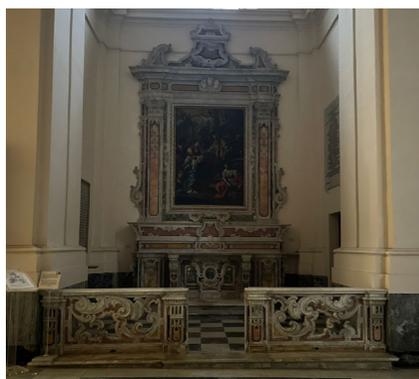


Fig. 74 – Cappella della Calce.

*Battesimo di Gesù* (Fig. 76).

#### *II: Cappella della Congrega di San Giuseppe*

La seconda cappella fu concessa dall'Arcivescovo Bonaventura Poerio alla Congrega di San Giuseppe. Sull'altare marmoreo è presente il dipinto del pittore salernitano Matteo Chiariello che raffigura il Transito del Patriarca. All'interno è presente la statua lignea di Sant'Antonio da Padova che, dalla prima cappella, fu ivi collocata dopo la realizzazione del fonte battesimale (Fig. 77).

#### *III: Cappella della Famiglia Pinto*

Anche la terza cappella fu concessa dall'Arcivescovo Bonaventura Poerio alla Famiglia Pinto. Per realizzare il luogo di culto i lavori furono commissionati a Virginio Ognà, il quale realizzò un imponente altare policromo in marmo sormontato dalla cona. Al centro, invece, fu collocata la tela raffigurante l'Immacolata con i santi Filippo Neri e l'arcangelo Michele, attribuibile al pittore Michele Ricciardi, attivo nel salernitano a partire da XVIII secolo (Fig. 78).

#### *IV: Cappella della Famiglia Lembo*

La quarta cappella in origine apparteneva alla Famiglia Lembo. Questo spazio molto ricco dal punto di vista artistico costituisce uno degli ambienti più belli dell'architettura barocca presente nella città di Salerno. Come testimoniato dai documenti contrattuali, il progetto fu affidato dal primicerio della cattedrale, Antonio Lembo, all'architetto Ferdinando Sanfelice. Le opere scultoree furono realizzate da Matteo Bottigliero mentre Virginio Ognà si occupò dell'altare e della cona marmorea. La struttura, completata nel 1722, è rialzata rispetto al piano di calpestio di quattro gradini. Essa, in marmo policromo, presenta sull'altare una coppia di angeli collocati ai lati delle due colonne che reggono una trabeazione, al centro della quale, tra due aquile, sono posti tre puttini in marmo bianco. Al centro dell'altare è posto il dipinto raffigurante la Pentacoste, opera di Francesco De Mura, allievo del pittore Francesco Solimena (Fig. 79).



Fig. 75 – La navata settentrionale della Cattedrale.



Fig. 76 – Cappella del Fonte Battesimale.



Fig. 77 – Cappella della Congrega di San Giuseppe.



Fig. 78 – Cappella della Famiglia Pinto.



Fig. 79 – Cappella della Famiglia Lembo.



Fig. 80 – Cappella di Santa Maria degli Angeli.

#### V: Cappella di Santa Maria degli Angeli o Famiglia De Ruggiero

La quinta cappella in origine apparteneva alla famiglia De Ruggiero che affidarono i lavori di restauro al marmoraro Domenico Guarino che realizzò per l'occasione l'altare marmoreo al centro del quale era posto il dipinto di San Nicola. Successivamente, per volere dell'Arcivescovo Pinto, il dipinto fu trasferito sulla parete laterale della cappella mentre al centro dell'altare fu collocata la monumentale scultura lignea di Santa Maria degli Angeli. Questa scultura, del XIII secolo, ricopre una notevole importanza nella scultura gotica dell'Italia Meridionale essendo databile tra il 1364 e il 1378. La statua lignea risponde alle caratteristiche di quell'epoca: lo sguardo è "soffuso di materna dolcezza" mentre la Vergine regge il Bambino Gesù. Sulla parete laterale è collocato un piccolo monumento funebre, di scultura tardo manierista che raffigura con molta probabilità Giovanni Francesco De Ruggiero e sua figlia (Fig. 80).

#### VI: Cappella di San Francesco da Paola

La sesta ed ultima cappella era dedicata a San Francesco da Paola ed apparteneva prima alla Famiglia Di Donato e poi alla famiglia Della Corte. Sull'altare è presente la tela di San Francesco da Paola che con molta probabilità fu realizzata dagli allievi di Paolo De Matteis (Fig. 81).

### 5.3 Il Transetto triabsidato

Fin dalla sua edificazione, la Cattedrale di Salerno si è sempre distinta nell'architettura medievale per due caratteristiche architettoniche di estrema originalità. La prima rappresentata, come già in precedenza descritto, dalla Cripta e la seconda rappresentata dal transetto triabsidato, elemento di assoluta novità nell'Italia Meridionale. Nel corso dei secoli, anche il Transetto, come del resto l'intera cattedrale, ha subito notevoli trasformazioni che ne hanno modificato la fisionomia artistica nei differenti movimenti estetici, culturali e ideologici che si sono susseguiti nel tempo.

Soltanto nel 1931, in seguito all'eliminazione delle sovrastrutture baroc-

che, il transetto della Cattedrale di Salerno fu riportato in massima parte all'originario stile romanico. Quest'area triabsidata, che insieme alla cripta, ricopre un ruolo fondamentale per le funzioni liturgiche, si presenta oggi piena di luce, con le capriate in vista e sei finestroni, tre posti sul lato meridionale e tre posti sul lato settentrionale, in perfetto stile romanico e scevra di qualsiasi ornamento barocco. Al centro, dinanzi all'abside centrale, è collocato l'altare maggiore, posto in asse con il sepolcro di San Matteo dell'ambiente ipogeo, che nel 1954 ha sostituito l'antica struttura barocca che fu realizzata dal marmoraro Virginio Ognà. Oggi, l'altare, rialzato sopra due gradini, è caratterizzato da struttura molto semplice recinta ai lati da rettangolari lastre marmoree in mosaico, dette plutei, fatte realizzare dall'arcivescovo Guglielmo da Ravenna nella metà del XII secolo. I plutei, all'interno dei motivi geometrici, racchiudono l'antica epigrafe che manifesta la devozione del committente al santo Matteo. Dinanzi all'altare, invece, sono poste due luminarie costituite da un alto basamento su cui sono collocate le due colonne in marmo verde, che un tempo si trovavano nel Quadriportico, ai lati della Porta di Bronzo (Braca, 2000).

L'intera area è adorna su tutti i lati da una serie di sculture, monumenti funebri, sarcofagi, lapidi e tante altre decorazioni. La loro sistemazione non segue alcun ordine cronologico ma esalta tutte le maestranze che, nei secoli, hanno contribuito alla magnificenza artistica del Duomo. Entrando dal Coro, sulla parete meridionale, troviamo una porta medievale, oggi murata, da cui forse si accedeva alla sala della Nona. A seguire è collocato il sarcofago romano all'interno del quale, secondo la tradizione, è sepolto Matteo D'Aiello. Sul sepolcro, che poggia su sei coppie di colonnine, è rappresentato la Vittoria di Dioniso alle Indie, mentre, sulla parete al di sopra del sarcofago, è presente un'ogiva che, in passato, sovrastava la porta di ingresso della *Schola Cantorum*. Una seconda ogiva, contenente un pregevole affresco, raffigurante la Madonna dell'Umiltà, sovrasta, invece, il sarcofago di Tommaso Santomango, nobile salernitano e vescovo di Capaccio; In prossimità dell'abside minore meridionale, è collocata sempre sulla parete una lapide che ricorda la costruzione del porto di Salerno nel 1260.

Sul versante opposto del transetto, incontriamo a partire da sinistra la lastra tombale dei canonici, il pluteo gotico con i santi, il monumento funebre dell'arcivescovo Piscitelli, il trittico raffigurante la Madonna delle Grazie, il monumento funebre dell'arcivescovo Bartolomeo D'Aprano ed infine il sepolcro di Monsignor Monterisi. Alle spalle dell'altare si apre l'abside



Fig. 81 – Cappella di San Francesco da Paola.



Fig. 82 – Il transetto triabsidato.



Fig. 83 – I mosaici musivi.

centrale, di dimensioni maggiore rispetto alle absidi laterali. Nel centro, è collocata, al di sopra di sette gradini, la cattedra di San Gregorio VII, il pontefice che consacrò nel 1084 il Duomo. Oggi, la fisionomia dell'abside è completamente diversa da quella del passato. Il maestoso mosaico che, oggi, ricopre l'intero catino e che cattura l'attenzione del visitatore nella basilica superiore fu realizzato dal gruppo di mosaicisti di Ravenna nel 1954, in occasione dei mille anni della traslazione a Salerno del corpo di San Matteo. Esso, definito da Cesare Brandi "uno scandalo" in "Omicidio in Cattedrale", andava a coprire la scarna parete su cui era stato rimosso il grande dipinto della Vergine Maria. Nella parte superiore del catino è rappresentata la Vergine, tra Alfano I e Gregorio VII; nella fascia inferiore, l'Angelo, simbolo di san Matteo, ha ai lati i pontefici che ebbero rapporti speciali con la cattedrale<sup>33</sup>. Invece, nella zona superiore dell'abside restano soltanto poche tracce di alcuni notevoli frammenti decorativi che in origine arricchivano la parete. Essi rappresentano *l'Aquila di San Giovanni* e la *Testa d'angelo di San Matteo* che lasciano intravedere la potenza del disegno musivo con un chiaro riferimento alle decorazioni di epoca medievale.

Alla sinistra e alla destra dell'abside centrale si aprono rispettivamente, le due absidi minori. L'abside di sinistra è nota anche come Cappella Reale o del Santissimo ed è interamente decorata da un mosaico integrato nel lato destro con affresco. L'altare di epoca barocca, in posizione centrale, è collocato tra due grandi affreschi raffiguranti *La caduta della manna* e *La comunione degli apostoli*, opera di Angelo Solimena. L'abside di destra in origine era chiamata Cappella delle Crociate poiché qui ricevevano la benedizione i pellegrini che partivano per la benedizione del sepolcro. Successivamente passò di proprietà a Giovanni da Procida che adornò interamente l'abside con mosaici raffiguranti i santi Matteo, Michele Arcangelo, Lorenzo, Fortunato, Giacomo e Giovanni. Essi, ancora oggi visibili, furono integrati nel 1772 da due dipinti raffiguranti *L'ingresso di Gregorio VII a Salerno* e *La concessione della mazza ai canonici* (Fig. 82).

### 5.3.1 I mosaici medievali

A titolo esemplificativo poniamo l'attenzione sui mosaici pavimentali che rivestono internamente l'area del transetto e del coro. Essi sono di straordinaria bellezza e costituiscono uno degli episodi artistici di epoca

normanna più interessanti della Cattedrale. Il committente di questo capolavoro fu Romualdo I Guarna, arcivescovo di Salerno dal 1121 al 1136 che, secondo diversi storici, affidò il progetto ad un sacerdote salernitano, di nome Alfano. Il pavimento "molto simile, come disegno e materiale, a quello delle basiliche romaniche", è stilisticamente riconducibile all'arte "cosmatesca" diffusasi tra il XII e il XIII ed influenzata dalla cultura dei mosaici del mondo bizantino. Roma, Venezia insieme a Ravenna detenevano praticamente il dominio di quest'arte la cui decorazione era ispirata chiaramente a motivi arabi e il mosaico, a sua volta, si componeva di piccole tessere in marmo policromo a forma di quadrato, triangolo e cerchio (Aceto, 1984). A tal proposito, ne sono esempi celebri quelli del Monastero di Santa Scolastica, a Subiaco, o quelli delle basiliche romane di San Paolo fuori le Mura, di San Giovanni in Laterano e della Basilica dei Santi Quattro Coronati (Carucci, 1983).

Anche nella Cattedrale di Salerno l'arte musiva sorprende per il ricco apparato decorativo organizzato in ampi riquadri in cui di disegni geometrici, seppur non si ripetono mai eguali nei moduli, nelle dimensioni e nei colori appaiono in perfetta armonia. La pavimentazione non segue alcun progetto artistico ad eccezione dell'area del coro in cui lo spazio è scandito simmetricamente in tre riquadri. Per la restante parte il disegno dei mosaici si adatta per lo più all'articolazione architettonica dello spazio e nell'area del transetto è suddiviso in venti riquadri<sup>34</sup>. Ogni singolo riquadro è diverso e la forma base di ogni singola composizione è data dal cerchio, posto generalmente in posizione baricentrica rispetto al quadrante e racchiuso da fasce circolari in marmo bianco e da altrettanti motivi geometrici la cui composizione è data invece dal quadrato e dal triangolo (Chiarenza and Messina, 2020) (Fig. 83).

### 5.4 L'atrium e la facciata esterna

Poco dopo la costruzione della Cripta della Basilica superiore i lavori all'interno del cantiere normanno proseguirono in maniera più lenta fino alla metà del XII con il completamento dell'atrium, detto Quadriportico, della facciata di ingresso e del monumentale campanile normanno (Fig. 84).



Fig. 84 – Il quadriportico della Cattedrale.

#### 5.4.1 Facciata Esterna e la Porta dei Leoni



Fig. 85 – La Facciata esterna.

Oggi, l'ingresso, frutto di diversi rimaneggiamenti che si sono susseguiti nei secoli, è preceduto da un'alta facciata, in stile neoclassico, scandita da due coppie di paraste simmetricamente disposte ai lati delle due colonne lisce che incorniciano il portale d'ingresso. La facciata è tipicamente romana, quindi piuttosto spoglia e semplice. A conferirle importanza è lo scalone monumentale e il portale medievale. Lo scalone, a doppia rampa laterale, fu realizzato nella seconda metà del XVIII secolo dall'arcivescovo Isidoro Sanchez De Luna e tale intervento sostituì, come descritto da Marsilio Colonna nel 1580, l'accesso romanico preceduto da una gradinata semicircolare di 12 scalini che ampliava il prolungamento dell'asse ottico dalla navata centrale dalla abside centrale del transetto fino alla piazza antistante l'ingresso, l'attuale Piazza Alfano I.

Dell'antico prospetto, la facciata, oggi, conserva solo il portale cosiddetto *Porta dei Leoni* per la presenza di due statue marmoree ai lati degli stipiti di marmo greco, raffiguranti un leone e una leonessa con un leoncino che hanno la testa rivolta con lo sguardo verso il basso e sono scolpiti in maniera naturalistica. Entrambi, come descritto dallo storico Carucci rappresentano non solo il simbolo araldico della famiglia d'Altavilla ma, posti all'ingresso, simboleggiano la potenza di Dio. Sull'architrave del portale è sistemata una lunetta con l'epistilio, anch'esso di fattura romanica, decorato agli estremi con l'araba fenice mentre una pianta di vite con decorazioni animali si snoda lungo l'intero portale. Ai lati sono raffigurati una scimmia e un leone rampante: la prima rappresenta il simbolo del male, l'altro il simbolo di Dio. Sono evidenti, in questa raffigurazione, chiari riferimenti alle simbologie di architetture paleocristiane, ellenistiche e bizantine mentre sui bordi dell'architrave sono collocati, nella fascia superiore e nella fascia inferiore, due distici che racchiudono l'epigrafe:

“(cruce) DUX ET IORDAN(nus) DIGNUS PRINCEPS CAPUANUS | REGNENT ETERNUM CUM GENTE COLENTE SALERNUM”. A tal proposito, i personaggi sopracitati (*Dux et Iordanus*) così come la datazione del portale dividono gli storici. Secondo alcuni critici d'arte, l'iscrizione fa riferimento alla pace tra Roberto il Guiscardo e il nipote Giordano di Capua e, dunque, rappresenta l'alleanza e la riconciliazione tra i principati di Salerno e di Capua avvenuta nel 1085. Secondo altri, i personaggi in questione possono essere identificati con Ruggero Borsa o Boemondo, eredi del principe normanno o, ancora, con Guglielmo II d'Altavilla. Nella lunetta, posta al di sopra dell'architrave, in origine, era

collocato un antico mosaico, sostituito nel 1768 dall'attuale affresco raffigurante il santo Matteo. L'altezza della facciata, in passato, era decisamente più bassa di quella attuale e, con molta probabilità, era uguale a quella dei bracci laterali del Quadriportico. Inoltre, fino alla metà del secolo scorso, sulla facciata della Cattedrale erano presenti, tra le due coppie di paraste, quattro oculi circolari che furono successivamente tamponati con gli interventi di restauro del dopoguerra mentre sul lato settentrionale, a ridosso della facciata, vi era il giardino del Palazzo dei baroni di Santomango, potente famiglia salernitana. Chiude il disegno della facciata un'ulteriore fascia di coronamento posta al di sopra della trabeazione (Fig. 85).

#### 5.4.2 Il Quadriportico

Durante il periodo barocco dell'atrio di epoca medievale si erano perse completamente le tracce. Solo in seguito ai lavori di restauro del secondo dopoguerra, sono stati rinvenuti notevoli resti dell'assetto originario dell'atrio, completamente nascosti da intonaci, pennacchi e tamponature del periodo settecentesco. L'atrio, meglio noto come Quadriportico, è costituito da un porticato coperto da volte a crociera e sorretto da quattro pilastri angolari e da ventotto colonne di spoglio (sei poste sui lati est ed ovest ed otto sugli altri due lati), la maggior parte provenienti dall'area del foro di Paestum, su cui si innalzano i piedritti degli archi a tutto sesto rialzato. Entrando, dal portale dei leoni, si trova la facciata del duomo caratterizzata da un corpo centrale rialzato con copertura a tetto spiovente (Fig. 86). Questa facciata è caratterizzata dalla presenza di tre ampie finestre nel corpo centrale sovrastate da un fregio marmoreo liscio, nel quale si sviluppa una seconda epigrafe:

“M · A · ET · EVANGELISTAE PATRONO VRBIS · ROBBERTUS DVX · R(omani) · IMP(eri) MAXIM(us) · TRIVMPHATOR DE AERARIO PECULLARP”.

Procedendo per ordine nella descrizione e partendo dal piano inferiore, negli ambulacri dell'atrio sono collocati diversi sarcofagi romani e lapidi di fattura romana la cui sistemazione non segue alcun ordine cronologico (Palmentieri, 2020). Sul braccio meridionale si aprono due porte che immettono nella Sala San Tommaso. Qui secondo la tradizione venivano svolte le lezioni della Scuola Medica Salernitana ove San Tommaso d'Aqui-

La cattedrale di San Matteo a Salerno  
Dettaglio, Porta dei Leoni



Fig. 86 – Dettaglio della porta dei Leoni.

no tenne un ciclo di conferenze.

Al piano superiore, al di sopra dell'ambulacro, è posizionato il loggiato caratterizzato da: quattro pentafore disposte simmetricamente ai lati della bifora centrale sui lati nord e sud, di una balconata barocca sul lato est e di sei bucatore sul lato ovest. La decorazione, di tipo parietale, insieme ai materiali lapidei caratterizza, in maniera scenografica, le facciate dell'ambulacro superiore. Il risultato, infatti, è davvero di rara bellezza. Il tufo grigio incornicia nella parte dell'estradosso con una ghiera semi-circolare sia gli archi superiori che quelli inferiori, composti a loro volta con conci di travertino che si alternano nei primi a tegole in cotto e nei secondi con conci di tufo. Questi ultimi poggiano su sottili colonnine bianche con capitelli a pulvino. A scandire il ritmo tra le gallerie e gli ambulacri vi è una fascia marcapiano di tarsie policrome e rosoni ornamentali posti in asse con ogni colonna, eccetto sul lato sud (Fig. 87). Sul lato del nartece, ossia il lato addossato alla facciata principale, si erge la "porta di bronzo" di epoca normanna, inscritta in un portale marmoreo<sup>35</sup>. Essa è costituita da 54 formelle metalliche raffiguranti, in gran parte, croci bizantine.

Nella parte superiore, sulla balaustra in marmo, campeggiano le statue dei santi Matteo, Bonosio e Grammario (Braca 2003, pp. 51-77) (Fig. 88).

La parte scoperta è pavimentata con basoli in pietra lavica e occupa uno spazio quadrato di circa 33,00m x 30,00m. Al centro di questa zona è posta una piccola vasca di marmo dal diametro di 2,00m, sostenuta da un piedistallo di altezza 1,50m. Essa, in realtà, è l'antico fonte battesimale che sostituì la grande vasca monolitica di granito egiziano che, per volere del re Ferdinando I di Borbone, nel 1825, fu trasportata a Napoli, all'interno della villa comunale, dove oggi poggia su quattro leoni. Il valore estetico di questa architettura non sfuggì agli storici che, sin dal 1500, ne descrivevano le caratteristiche. Difatti, grazie alle loro fonti e alle descrizioni dei Viaggiatori, sappiamo che l'attuale fontana in realtà esprime solo il ricordo di una originaria scenografia ben visibile in una celebre incisione di J.L. Desprez. Essa, infatti, con la sua grandezza (diametro di sei metri) raccordava e scandiva lo spazio dell'intero Quadriportico (Fig. 89).

La della Cattedrale di San Matteo a Salerno  
Architettura parietale nel Quadriportico: i rosoni circolari

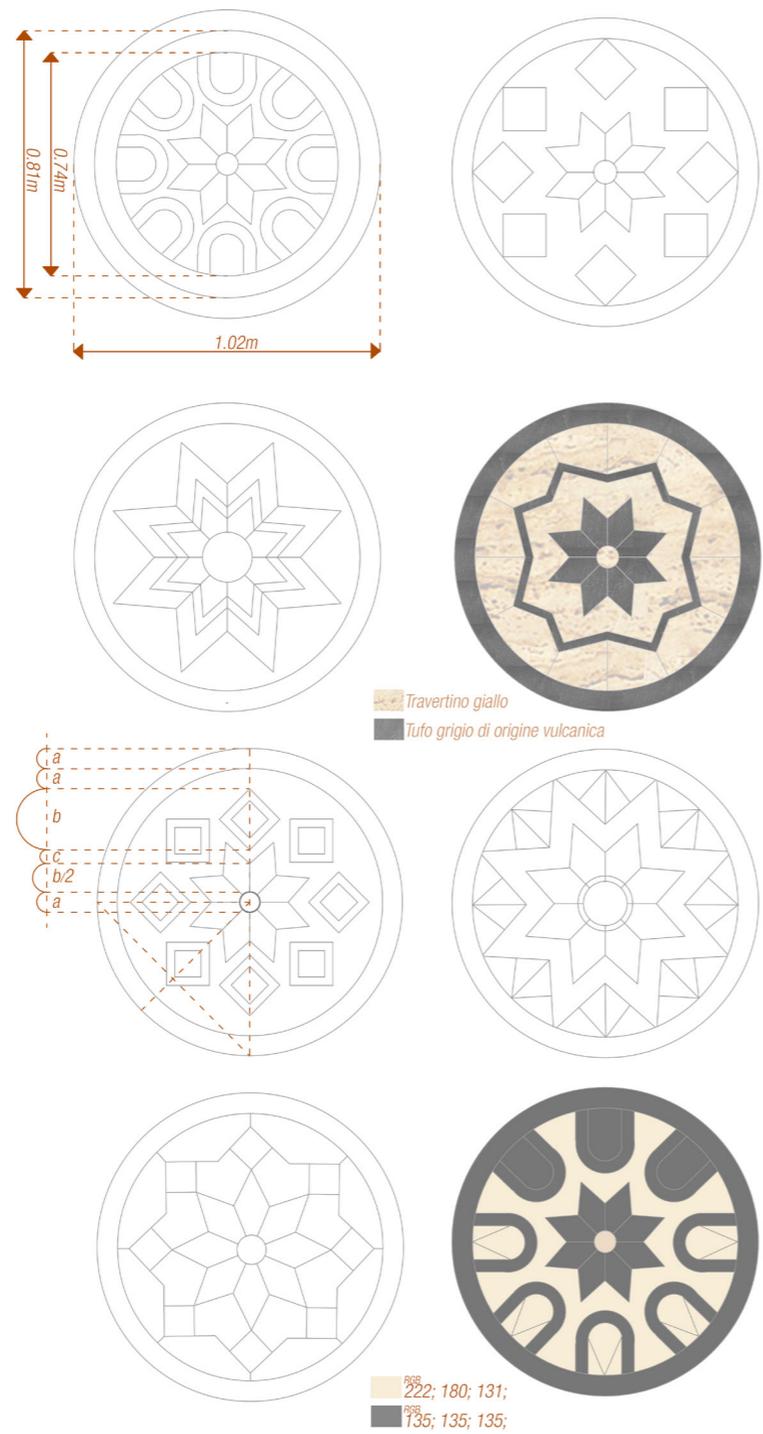


Fig. 87 – Le tarsie del Quadriportico.

La cattedrale di San Matteo a Salerno  
Dettaglio, Porta del Paradiso



Fig. 88- Dettaglio della facciata del narthex del Quadriportico

## Note

1 - Nello specifico, il lavoro di analisi storica di questo paragrafo rientra nella tesi di laurea magistrale in Architettura dal titolo “Architettura normanna nel sud Italia: il duomo di Sant’Agata dei Goti” del dott. Lorenzo Francesco Barberio, discussa presso il Dipartimento architettura della Federico II. Il lavoro è stato condotto sotto la supervisione del prof. arch. Massimiliano Campi, tutor di tesi e dell’arch. Marika Falcone, co-tutor.

2 – cfr. Carucci A., *Il Duomo di Salerno e il suo Museo*, 1962.

3 - Matteo, su Santi, beati e testimoni, [santiebeati.it](http://santiebeati.it).

4 – Papa Gregorio VII, nato Ildebrando di Sovana (1024 - 1085), fu una delle personalità più innovative del Medioevo e protagonista di un’azione ecclesiologica e politica articolata e complessa. Fu eletto papa nel 1073 avviando un sostanziale programma di riforma della Chiesa con il *Dictatus papae* con il quale affermò la superiorità del papato su ogni autorità temporale; Quale anno più tardi, nel concilio del 1075, si pose come campione della *libertas Ecclesiae* e della concezione teocratica, con ciò entrando in aperto conflitto con il re di Germania Enrico IV e aprendo un periodo di conflitti noto come “lotta per le investiture”.

[https://www.treccani.it/enciclopedia/gregorio-vii-papa-santo\\_%28Dizionario-Biografico%29/](https://www.treccani.it/enciclopedia/gregorio-vii-papa-santo_%28Dizionario-Biografico%29/)

5- Sulla traslazione del santo Matteo si veda Delogu 1977, p.181-190;

6- <https://www.velia.it/storia.htm>.

7 - <http://ambientesa.beniculturali.it/BAP/?q=notizie&ID=877>.

8 – Das Regesti Gregors, cit., pp. 526-527.

9- “M · A · ET · EVANGELISTAE PATRONO VRBIS · ROBERTUS DVX · R(omani) · IMP(eri) MAXIM(us) · TRIVMPHATOR DE AERARIO PECULIARI”. Questa è la seconda epigrafe che nomina esplicitamente Roberto il Guiscardo che viene glorificato per la sua generosità. Il nome del condottiero compare anche nell’iscrizione del Portale del Paradiso.

10- Si veda Apicella 2009, pp.183;

Ms. 19 presso la biblioteca provinciale di Salerno, fol. 37, famiglia Ruggero: “È solito a questa famiglia nella traslazione del corpo di san Matteo tributarsi ogni anno un arbore con rami di mortelle che da preti diocesani si presenta all’arcivescovo e poi dai medesimi processionalmente si porta ad uno della famiglia in giro e si lascia in sua casa per causa che diedero alcune loro case che si diroccarono per far il largo davanti la chiesa di San Matteo”

Cfr. A. Braca, 2003, p.19.

11 – Sulla morfologia del suolo del centro antico della città di Salerno si veda: A. Braca,

Salerno e la forma Urbis: iconografia ragionata della città dal Medioevo all’età moderna, in *Storia dell’Università di Salerno* a cura di Musi A. et al., 2001; F. Cifelli e U. Santoro, Il centro antico di Salerno attraverso l’analisi dell’ambiente fisico, in *Apollo* n.s. XI, pp. 102-115, 1995; S. Siniscalchi, *Per una geografia storica di Salerno. Le fonti cartografiche*, Roma: Aracne editrice, 2020.

12- L’inizio dei lavori, come indicato da diverse fonti, avvenne nel 1080 con la costruzione della cripta i cui lavori iniziarono in quell’anno poiché dalle epigrafi delle tombe dei ss. Martiri salernitani e di San Matteo si legge la data marzo del 1081. Alcuni studiosi (Braca, Capone, Carucci, Gandolfo) concordano che i lavori della cripta terminarono circa sei mesi dopo mentre l’edificazione della chiesa venne ultimata nel 1085. Successivamente fu ultimato il quadriportico. Invece lo studioso Aceto sostiene che al momento della consacrazione anche il quadriportico era stato in parte realizzato eccetto il campanile.

Cfr. F. Aceto in *Enciclopedia dell’arte medievale*, 1999 (on-line), A. Braca 2003 pp. 17-21, A. Capone, 1927, A. Carrucci 1989 e F. Gandolfo 1999, p.23.

13- “(crux) DUX ET IORDAN(nus) DIGNUS PRINCEPS CAPUANUS || REGNENT ETERNUM CUM GENTE COLENTE SALERNUM” (Il Duce e il meritevole principe Giordano di Capua possano regnare su Salerno, con la gente che vi abita, in eterno).

14 – Sulla storia dell’architetto si veda: M.G. Pezone, Carlo Buratti. *Architettura tardo barocca tra Roma e Napoli*, Napoli, Alinea, 2008.

15 - [https://www.poerioweb.it/?page\\_id=150](https://www.poerioweb.it/?page_id=150).

16- I lavori di restauro del dopoguerra si concentrarono sul Quadriportico che oggi si presenta in stile romanico. Sull’argomento si veda A. Schiavo, *Il Quadriportico del Duomo di Salerno* in *L’osservatorio Romano*, 1947; G. Rosi, *L’atrio della cattedrale di Salerno*, in *B.d.A.*, pp. 225-238.

17- Cfr. G. Chierici, *Il duomo di Salerno e la Chiesa di Montecassino* in *Rassegna Storica Salernitana*, 1937. Tra le altre fonti su questo argomento si veda A. Schiavo, *Salerno e Montecassino*.

18- Rilievi ed opere architettoniche del Cinquecento a Montecassino, in “*Cassinesia*”, Montecassino, 1929.

19 – Leone Marsicano, *Chronica Monasteri Casinesis*, cit. pp. 574-727.

20- Lo schema basilicale adottato e le maestranze coinvolte nel cantiere divennero di fatto dei punti di riferimento per altre fondazioni coeve e successive.

La nuova basilica si presentava, orientata ad est, a tre navate, con dieci colonne per parte, dotata di un transetto e tre absidi, quest’ ultime poste in asse con le navate. La tipologia delle tre absidi terminali poste alla fine delle tre navate, spesso intervallate da transetto, le vedremo utilizzate, seppur di dimensioni diverse per molte chiese costruite in negli anni seguenti. Dinanzi la chiesa si ergeva un quadriportico con torri sul braccio orientale. Il nartece era provvisto di cinque *fornices spiculi* probabilmente simili a quelli che oggi si ammirano a Sant’Angelo in Formis. secondo cui: i) l’impianto e la navata erano separata da file di colonne; ii) tre absidi tripartivano l’area terminale; iii) L’area del presbiterio era



Fig. 89 - Incisione di J.L. Desprez.

rialzata tramite gradini e dotata di transetto.

Davanti alla basilica vi era: la presenza di un quadriportico preceduto da una scalinata con le torri sul braccio orientale.

21 – Crf. A. Braca, *Il Duomo di Salerno*, pp.47-49, 2003. Il rilievo descritto da Vincenzo Sebastiano e Maria Cristina Cioffi è stato effettuato con tecniche tradizionali di rilievo diretto per trilaterazione e rilievo topografico, con il contributo del tecnico Antonello Trevisone.

Il rilievo eseguito per questo lavoro di tesi di Dottorato è stato condotto con tecnologie di rilievo no-contact. Nello specifico, in data Luglio 2021, l'intera cattedrale è stata rilevata con la metodologia Laser Scanner. Per questa operazione è stato fondamentale il supporto dell'arch. Valeria Cera, rtda presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II. In data Ottobre 2021, invece è stato eseguito un secondo rilievo utilizzando la strumentazione NavVis VLX grazie al supporto dell'azienda 3D Scan – Smart Surveying di Monza. In tal caso, le operazioni sono state condotte dal prof. arch. Massimiliano Campi (tutor di tesi), dall'arch. Marika Falcone e dall'arch. Sergio Sabbatini (co-tutor di tesi). Al termine delle operazioni sul campo sono stati effettuati diversi confronti che hanno permesso di determinare la tecnologia che meglio risponde agli obiettivi di tesi. Nel capitolo IX viene mostrato tutto il lavoro.

22 – È difficile stabilire se, in epoca medievale, questa era la conformazione spaziale della Cripta. Possiamo desumere alcune informazioni da mons. Colonna, in *De Vita Gestis* in cui afferma: *“Quadratum est in media Crypta spatium, quod lapidei, cancellatique parietes bicubitales ambiunt, ad ulnas ex omni latere duodecim, quo veluti septo altare cingitur vetustissimum, sub quo thesaurus ille repositus est; ita ut ipse per ferreos cancellos comode videri possit”*.

23- D. Fontana, *Libro secondo in cui si ragiona di alcune fabbriche fatte a Roma et Napoli*, Napoli, 1604.

Cfr. A. Braca, *Il Duomo di Salerno*, pp. 222-224, 2003.

24 – Cfr. A. Carucci, 1962.

25- Domenico Fontana era l'architetto di corte del vicerè di Spagna.

26- M.I. Catalano, Michelangelo Naccherino in *Civiltà del Seicento a Napoli*, Napoli, pp.219-221, 1984.

27- I santi a cui si fa riferimento sono: Gaio, Fortunato ed Ante.

28- Belisario Corenzio era un pittore di origine greca, attivo a Napoli dal 1590 al 1646. Egli rappresentò nelle sue opere la cultura tardomanierista dell'epoca facendosi, al contempo, interprete delle istanze della Chiesa della Controriforma.

29- Seppur realizzati in anni differenti, generalmente, si è soliti considerare questi due amboni come coevi. Entrambi gli amboni sono rivestiti da sculture e mosaici preziosissimi tipici della cultura Medioevale con chiari riferimenti alle architetture normanne, realizzate in quegli anni.

30- Il committente di questo ambone, detto anche minore, si evince dalla seguente iscri-

zione: “Romualdus secundus salernitanus Archi/episcopus praecepit fieri hoc opus”.

31 – Per la descrizione delle cappelle della navata meridionale e settentrionale si fa riferimento ai seguenti studiosi: A. Capone, *Il Duomo di Salerno*, vol.2, 1927; De Angelis, *Nuova Guida del Duomo di Salerno*, 1937; A. Braca, *Il Duomo di Salerno*, 2003;

32 - Nel 1688, dopo il violento terremoto, furono registrati enormi danni su tutto il territorio campano. In modo particolare, la città di Benevento fu quella più colpita.

33- Questa decorazione ha subito gravi danni durante i diversi e ripetuti terremoti che si sono susseguiti nel tempo. Secondo le fonti secentesche locali la committenza fu ad opera di Alfano I.

34- A partire dalle nuvole di punti, ottenute con Laser Scanner e NavVis VLX, sono state predisposte in ambiente CAD delle viste planimetriche su cui è stata rilucidata, in dettaglio, l'intera pavimentazione del transetto così come l'intera cattedrale.

35- La porta ha un'apertura centrale a doppia anta dalle dimensioni di 3,40 x 5,20 metri. Di queste porte, con questa fattura, attualmente ne esistono solo sette in tutta la penisola italiana e site ad Amalfi, Montecassino, Atrani, San Paolo f.l.m, Monte Sant'angelo, Venezia e Salerno.

36- La fontana era sopraelevata dal piano di calpestio da due basoli circolari. 5- Sulla traslazione del santo Matteo si veda Delogu 1977, p.181-190;

CAPITOLO SESTO

**Il progetto di monitoraggio della Cattedrale di  
San Matteo a Salerno: dal modello digitale alla costruzione  
del modello previsionale mediante Intelligenza Artificiale**

### 6.1 Definizione del modello tridimensionale

Per condurre un'indagine diagnostica propedeutica alla costruzione di modelli previsionali, si è ritenuto opportuno sviluppare una metodologia di ricerca che integra le diverse tecniche di rilievo. La scelta delle diverse tecnologie e dei metodi di indagine impiegati è stata necessaria per rispondere alla domanda di ricerca prefissata. Nello specifico, i temi analizzati nei capitoli precedenti hanno trovato applicazione nella sperimentazione su uno specifico caso studio: la cattedrale di San Matteo a Salerno. Pertanto, dopo aver valutato le caratteristiche architettoniche del sito, per la raccolta dei dati morfo-metrici sono state impiegate procedure di acquisizione ed elaborazione che hanno visto l'utilizzo e l'integrazione di differenti metodologie *range-based* organizzate in più fasi di lavoro, a loro volta articolate in sottofasi:

a) Costruzione del modello tridimensionale multi-scalare con sensori *bi-gh-cost* per la realizzazione di un modello geometrico digitale rappresentativo dell'intero complesso:

- (i) rilievo TLS - *Terrestrial Laser Scanner* a modulazione di fase con Focus 3D s120 per acquisire, in modalità statica, una nuvola di punti dettagliata con elevata accuratezza metrica e geometrica;
- (ii) rilievo mobile mapping con NavVis VLX, per acquisire con tempi estremamente ridotti, in modalità dinamica, una nuvo-

la di punti dettagliata con elevata accuratezza metrica e geometrica;  
 (iii) analisi e comparazione dei modelli tridimensionale ottenuti per evidenziare le differenze del dato in termini di quantità e qualità di punti elaborati da sensori diversi, oltre che i risultati derivanti dall'acquisizione di tipo statico e di tipo dinamico.

b) Raccolta ed integrazione dei dati mediante l'utilizzo di sensori *low-cost*: integrazione del modello digitale ed approfondimento critico dei dati acquisiti nonché delle parti ammalorate:

- (iv) rilievo fotogrammetrico terrestre per l'approfondimento del dato colorimetrico, della tessitura superficiale e per l'integrazione di parti mancanti;
- (v) rilievo da LiDAR Scanner da smartphone per l'acquisizione della tessitura superficiale delle parti ammalorate in modalità dinamica;

Nello specifico, nei paragrafi successivi vengono descritte le relative fasi di acquisizione e di processamento dei dati.

i valori RGB<sup>2</sup>. Esaminate le caratteristiche tecniche della strumentazione presa in esame, si è proceduti alle fasi di acquisizione del dato.

Dopo aver analizzato la morfologia dell'area oggetto di studio, sono stati individuate le posizioni di scansioni utili a coprire l'intero complesso religioso e, in tal caso, è stato fondamentale adottare strategie che abbiano ridotto al minimo il numero delle acquisizioni, ottimizzando i tempi di lavoro in situ ed evitando di acquisire una moltitudine di dati difficili da gestire in fase di processamento. L'intera area è stata rilevata attraverso l'acquisizione di 75 range maps, impostando una risoluzione media di 6 mm ad una distanza di 10 metri ed un'accuratezza di 4x3. Per facilitare le successive fasi di elaborazione e allineamento delle singole range map sono stati utilizzati target sferici e piani per la referenziazione delle singole nuvole. In tal modo, è stato possibile garantire un'elevata definizione delle superfici scansite, attraverso sovrapposizioni adeguate tra nuvole di punti consecutive e, al contempo, si sono limitate le difficoltà di gestione del file dovute alla ridondanza del dato.

## 6.2 Costruzione del modello tridimensionale multi-scalare con sensori high-cost: TLS e MMS

### 6.2.1 TLS – Terrestrial Laser Scanner

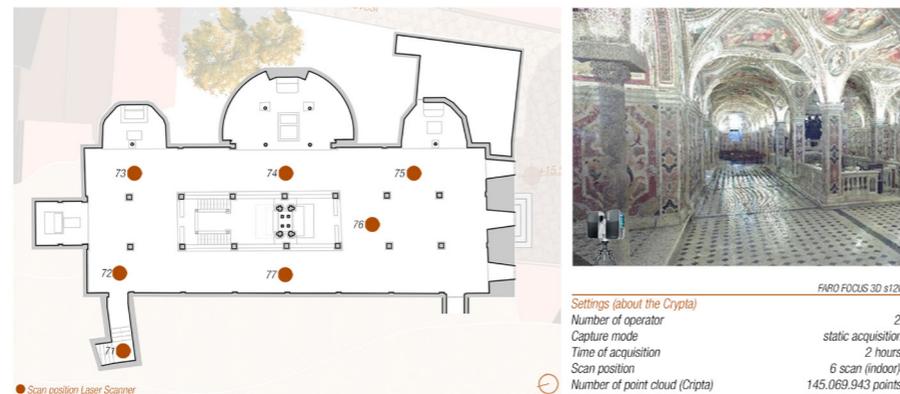
Sulla base delle considerazioni sopracitate, per la prima campagna di acquisizione, il rilievo della Cattedrale di San Matteo è stato eseguito con un laser scanner a modulazione di fase Faro Focus 3D s1201 in dotazione al Laboratorio Tir Lab del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

Il sensore impiegato restituisce informazioni di distanza nominale in un range compreso tra 0,60 metri e 120 metri, con un'accuratezza di  $\pm 2\text{mm}$  a 25 metri ed una risoluzione angolare di  $0.009^\circ$ . Il campo visivo sull'asse orizzontale è di  $360^\circ$  mentre quello verticale è di  $305^\circ$  con una velocità di acquisizione pari a 976.000 punti/sec. Inoltre, la strumentazione ha un peso di circa 5 Kg (con dimensioni pari a 240x200x100 metri) che ne consente un veloce impiego sul campo con una messa in stazione su treppiede fotografico. Nello strumento, inoltre, è integrata una camera digitale con asse ottico coassiale al raggio di misura del laser, che permette la restituzione delle informazioni colorimetriche di ogni punto registrato attraverso

Fig. 90 – Schema di acquisizione (statica) con Laser Scanner.



Fig. 91 - Schema di acquisizione (statica) della Cripta con Laser Scanner.



Le impostazioni dei parametri scelti hanno influito sul tempo di acquisizione del dato e questa fase è stata condotta sul campo da due operatori e si è conclusa dopo due giorni di lavoro. Terminate le operazioni di rilievo in situ, si è proceduto alle fasi di elaborazione del dato.

Le 76 range maps sono state allineate con il software proprietario Faro Scene e tale elaborazione è consistita nella costruzione della matrice di roto-traslazione delle singole scansioni, effettuata individuando tre punti comuni o due punti comuni mediante l'ausilio dell'inclinometro tra scansioni adiacenti. Nelle fasi di allineamento sono state utilizzate procedure di riconoscimento semi-automatico di target e punti naturali che hanno restituito una nuvola puntiforme finale di circa 1.452.256.249 di punti. Tale procedura ha registrato livelli di errore di allineamento inferiore ai 2 mm in prossimità dello strumento e di 4 mm per le aree con maggiori distanze (Figg. 90-91).

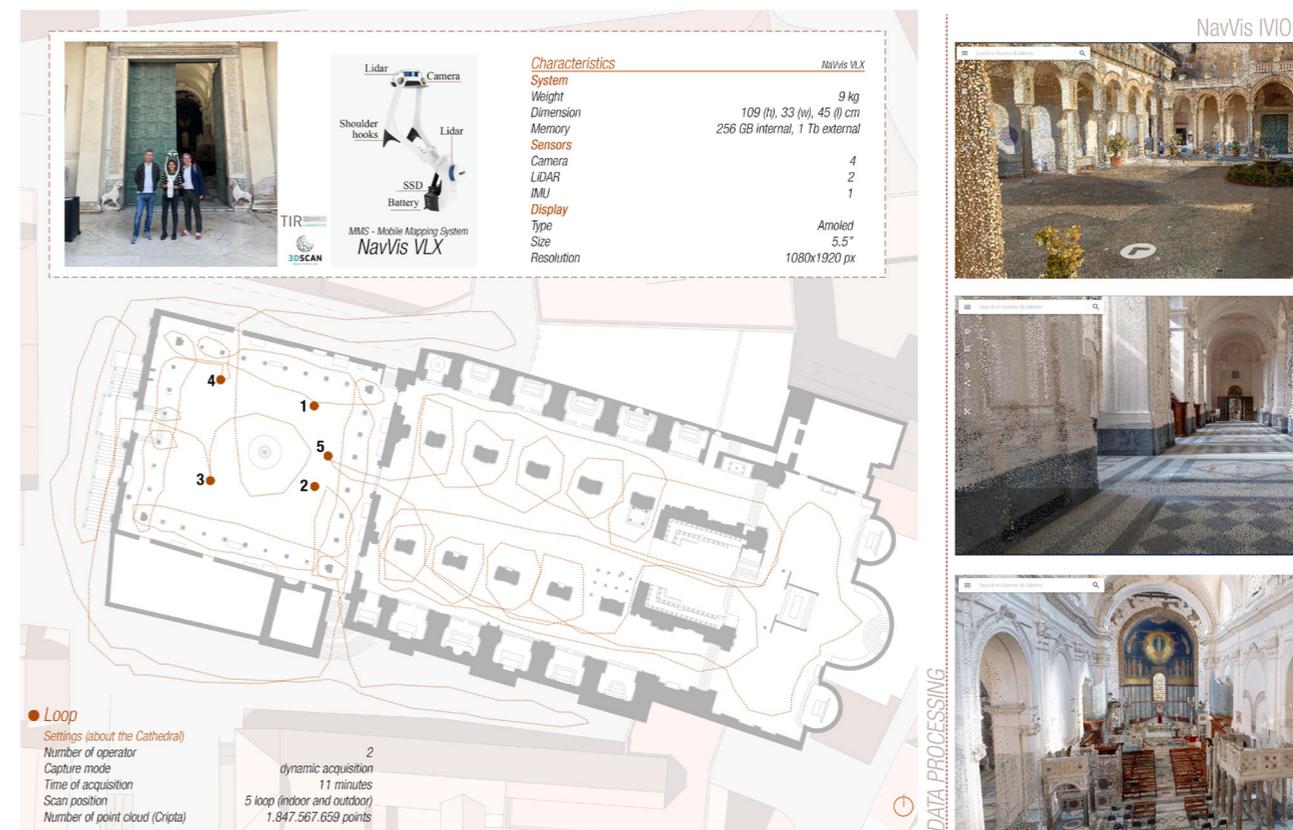
Successivamente, la nuvola di punti è stata importata nell'applicativo Recap Pro dell'Autodesk, per la gestione dei dati. Più precisamente, la nuvola è stata ripulita eliminando le zone di rumore. Inoltre, la nuvola di punti finale, ha consentito una lettura inedita dell'ambiente ipogeo da cui sono state estratte, attraverso piani di sezione, orizzontali e verticali, le informazioni utili alla rappresentazione grafica bidimensionale. Alla fine del capitolo vengono riportati gli elaborati grafici che, dal generale al particolare, mettono in luce la magnificenza della Cattedrale.

### 6.2.2 MMS – Mobile Mapping System NavVis VLX

La seconda fase di acquisizione dei dati ha esaminato una metodologia con procedura di scansione dinamica. In modo particolare, la cattedrale è stata

rilevata con un sistema mobile mapping NavVis VLX – dell'azienda tedesca NavVis4. Questo tipo di strumentazione consente di rilevare informazioni tridimensionali indossando lo strumento e camminando all'interno dell'area oggetto di studio<sup>6</sup>. La strumentazione è composta da due sensori LiDAR, posizionati in corrispondenza del petto e del capo, che registrano misurazioni tridimensionali in cui il dato colorimetrico viene integrato da quattro telecamere posizionate sulla parte superiore del dispositivo con acquisizione di immagini ad alta risoluzione a 360°. Il tutto viene registrato in real-time mostrando sull'interfaccia il percorso eseguito, garantendo di verificare così i dati rilevati. La strumentazione, dalle dimensioni 1080 × 330 × 560 mm, ha un peso di circa 9 kg (incluso il peso delle batterie) ed è in grado di acquisire fino a 600.000 punti al secondo con una distanza massima di 40 metri in ambienti indoor e di 30 metri in ambienti outdoor ed una precisione di circa 6 mm. La possibilità di registrare dati in movimento, insieme ad un'accurata fase di pianificazione per eliminare errori di deriva, ha reso il lavoro sul campo estremamente veloce. Difatti, è importante sottolineare, come nel suddetto caso, i tempi di acquisizione si sono drasticamente ridotti rispetto al rilievo laser scanner.

Fig. 92 - Schema di acquisizione (dinamica) della cattedrale con NavVis VLX



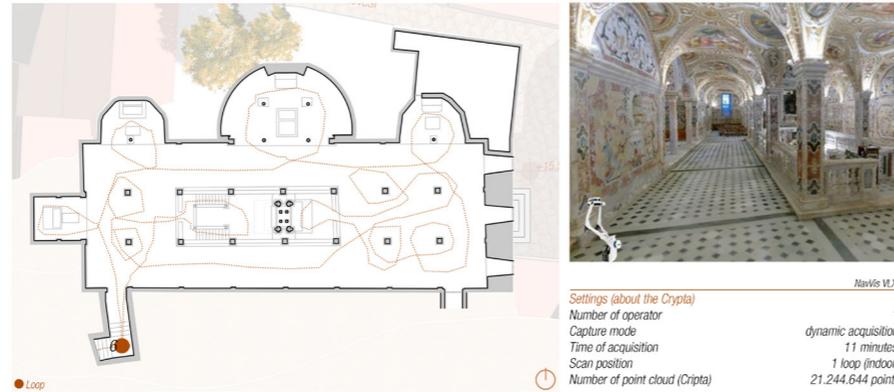


Fig. 93 - Schema di acquisizione (dinamica) della Cripta con NavVis VLX.

L'acquisizione ha avuto una durata di circa tre ore di lavoro e i dati tridimensionali sono stati registrati in un unico loop. Per ridurre possibili divergenze, nelle fasi di acquisizione è stata impiegata la tecnica "round-trip" (Fig. 92).

In tal caso, la procedura di acquisizione dei singoli loop è stata portata al termine nel punto di partenza. In questa fase non sono stati utilizzati target ed il rilievo è stato condotto da un unico operatore. Parallelamente alla scansione, invece, sono state scattate dall'operatore in modalità manuale numerose foto sferiche con un intervallo di tempo pari a circa un minuto (Fig. 93).

Terminata la fase di acquisizione, il processamento dei dati provenienti dal sensore attivo è avvenuto attraverso la piattaforma cloud del software proprietario NavVis (Figg. 94-119). In seguito, vengono riportati tutti i singoli passaggi che hanno permesso di ottenere il modello tridimensionale della Cattedrale. Il risultato è una nuvola di 1.847.567.659 punti.

### 6.2.3 Analisi e comparazione tra sistema statico e sistema dinamico

Concluse le fasi di processamento dei dati tridimensionali, i risultati ottenuti hanno costituito un supporto fondamentale all'analisi del sito. Tali risultati sono stati esaminati, con la comparazione dei modelli tridimensionali, a diverse scale di dettaglio, dal generale al particolare. Ulteriori riflessioni sono state condotte anche sulla precisione e sulla velocità di acquisizione ed elaborazione dei dati, ottenuti da due differenti metodi di indagine, che hanno prodotto due nuvole di punti differenti. Pertanto, è stato possibile confrontare l'accuratezza geometrica delle nuvole di punti valutando, di ciascuna metodologia, limiti e potenzialità con successive analisi puntuali

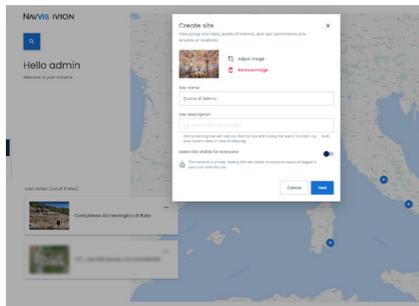


Fig. 94 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Creazione del sito.

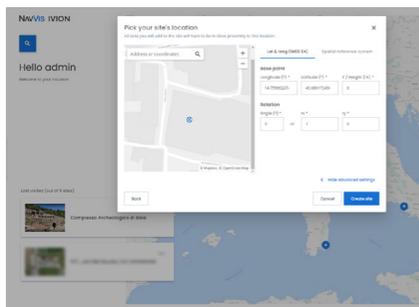


Fig. 95 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Localizzazione del sito.

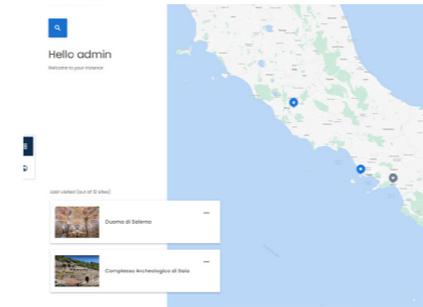


Fig. 96 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Mappa dei siti attivi e da elaborare.

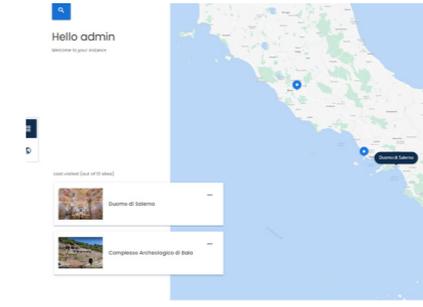


Fig. 97 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Selezione del sito da elaborare.



Fig. 98 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Menu, Operazioni disponibili.

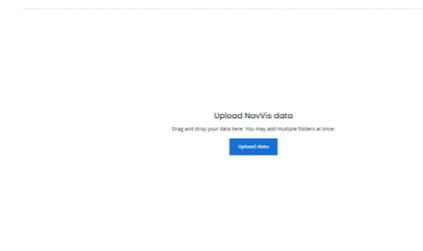


Fig. 99 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Creazione del sito.

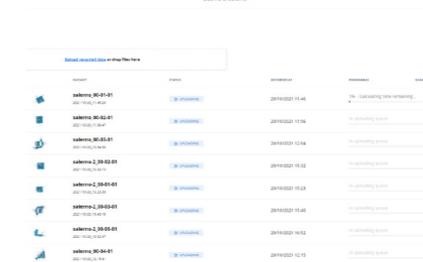


Fig. 100 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Upload dei dati.

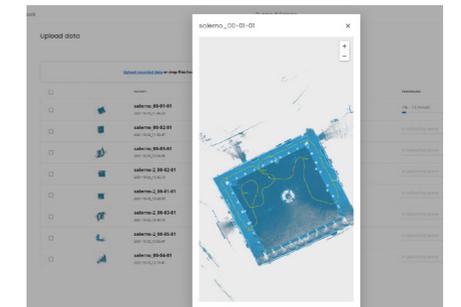


Fig. 101 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Zoom mappe dei dataset.

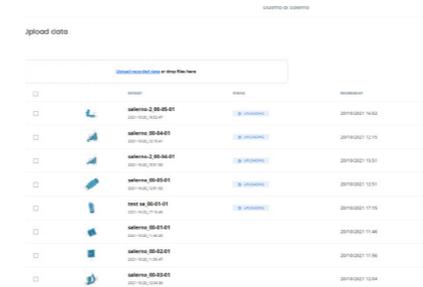


Fig. 102 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Upload dei dati.

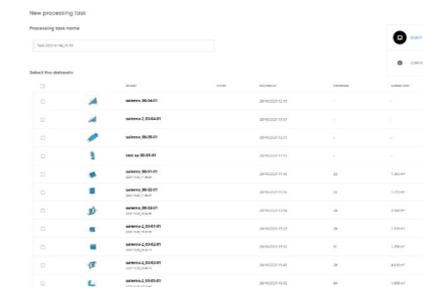


Fig. 103 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Elaborazione dei dati.

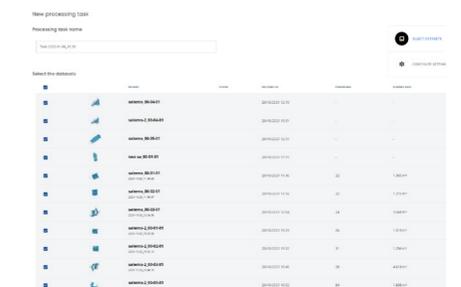


Fig. 104 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Elaborazione dei dati.

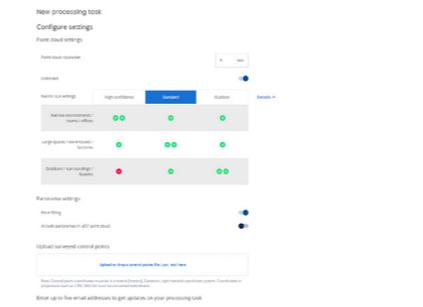


Fig. 105 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Elaborazione dei dati.

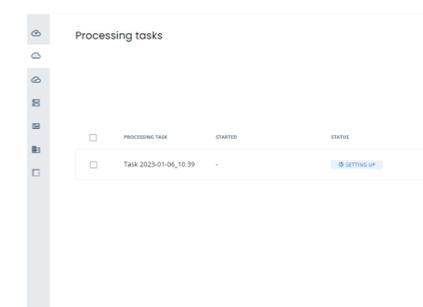


Fig. 106 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Elaborazione dei dati.

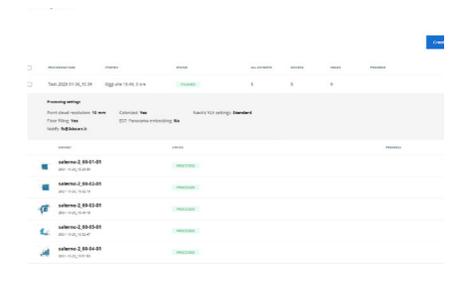


Fig. 107 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis - Risultato dell'elaborazione dati.

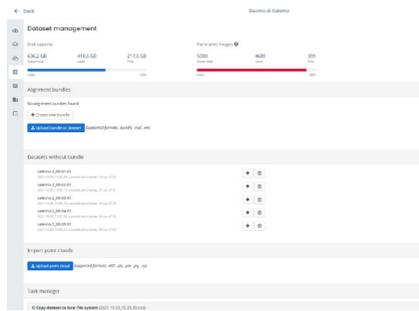


Fig. 108 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Download e Management.

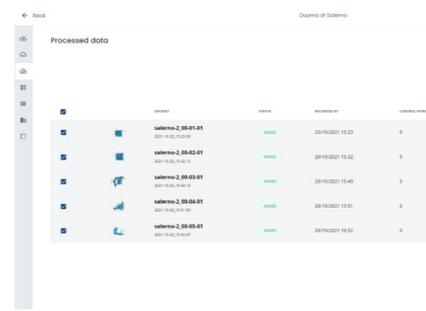


Fig. 109 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Management.

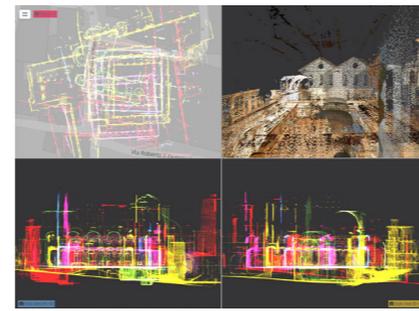


Fig. 110 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Allineamento dataset.

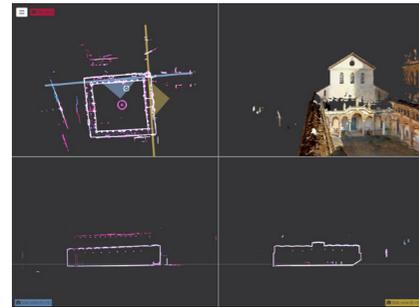


Fig. 111 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Allineamento due dataset.



Fig. 112 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Allineamento sulla mappa.



Fig. 113 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Registrazione completa dei dataset

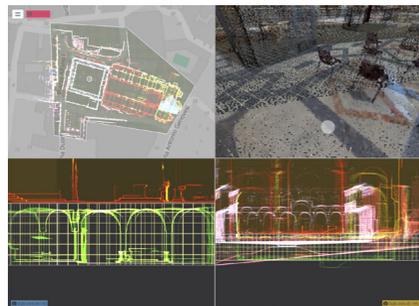


Fig. 114 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Registrazione completa dei dataset.

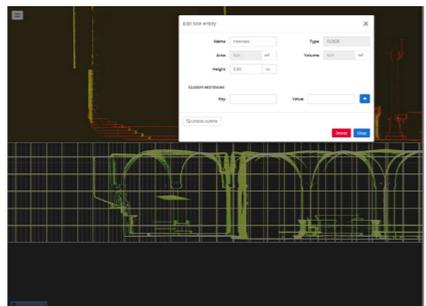


Fig. 115 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Generazione dei livelli.

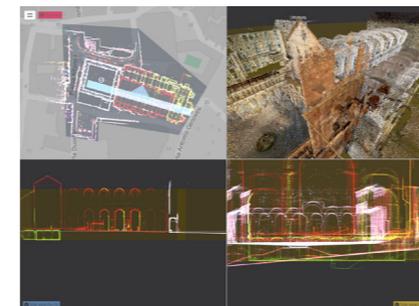


Fig. 116 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Registrazione completa dei dataset.

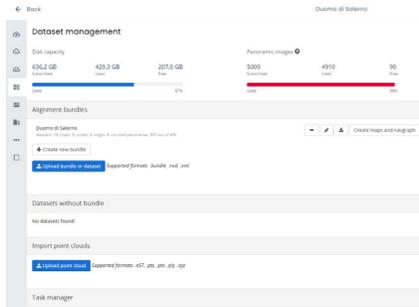


Fig. 117 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Suddivisione dei dataset per piano.



Fig. 118 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Creazione delle mappe per il tour fotografico.

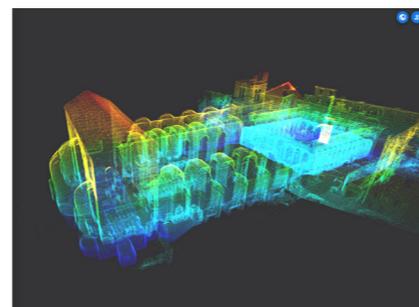


Fig. 119 - Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Vista della nuvola in falsi colori.

anche sui valori di densità e *roughness*.

Di seguito vengono riportati i risultati delle comparazioni fatte.

Una prima fase di valutazione ha visto un'osservazione diretta delle due nuvole di punti che mostrano nel complesso una buona ricostruzione tridimensionale della cattedrale, fatta eccezione per alcune aree. La prima differenza evidente è nella qualità dei dati raccolti. I dati, rilevati da laser scanner Faro 3D s120 sono più dettagliati rispetto, a quelli della strumentazione NavVis VLX mentre le caratteristiche colorimetriche di quest'ultima sono senza dubbio superiori. Ad una osservazione visiva più accurata, la nuvola di punti NavVis è completa in tutte le sue parti a differenza della nuvola laser che mostra, a causa dell'acquisizione statica dello strumento, alcune mancanze in prossimità degli ambienti voltati degli altari. Prima di procedere alla prima comparazione, è stato necessario un filtraggio dei dati decimando la nuvola generata dalla strumentazione laser scanner che contava un numero di punti nettamente superiore alla nuvola acquisita con la metodologia MMS.

Successivamente, le procedure di allineamento sono state condotte nell'applicativo *open source Cloud Compare* ove è stato necessario allineare la nuvola di punti NavVis VLX al dataset *Laser scanner*, utilizzato come nuvola di riferimento per la procedura di registrazione con l'algoritmo ICP (*Interactive Closest Point*) (Fig. 120).

Per la procedura di allineamento sono stati individuati manualmente cinque punti omologhi, caratteristici su entrambi i modelli. A questo punto è stata applicata una roto-traslazione rigida riscontrando un errore di allineamento RMSE (*Root Mean Square Error*) tra i due dataset pari a 0.04 m. Infine, sono stati calcolati i valori di distanza nuvola/nuvola. Questo primo confronto, come riportato nella figura, mostra dei risultati assolutamente soddisfacenti. Come si legge nell'istogramma, la distribuzione dei punti analizzati riporta che la maggior parte di essi cade nell'intervallo di errore compreso tra 0 e 0,02 m con nette discrepanze in quelle parti non rilevate dal laser scanner (Fig. 121).

La stessa procedura è stata condotta anche per l'ambiente ipogeo (Fig. 122). Volendo trarre un campo di sperimentazione che riguarda le tecniche di rilievo *'rapid mapping'* per il monitoraggio continuo delle architetture con sistemi di acquisizione *mobile mapping system* in questa fase pre-

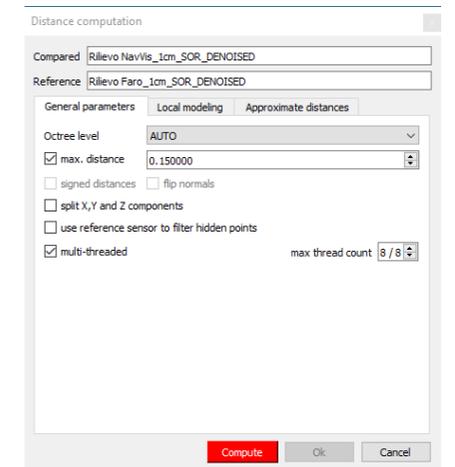


Fig. 120 - Comparazione dei dati. Distance computation. Impostazione dei parametri.

Fig. 121 - Comparazione dei dati della cattedrale. Distance computation.

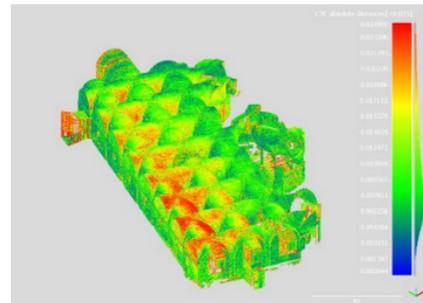


Fig. 122 - Comparazione dei dati della Cripta. Distance computation.

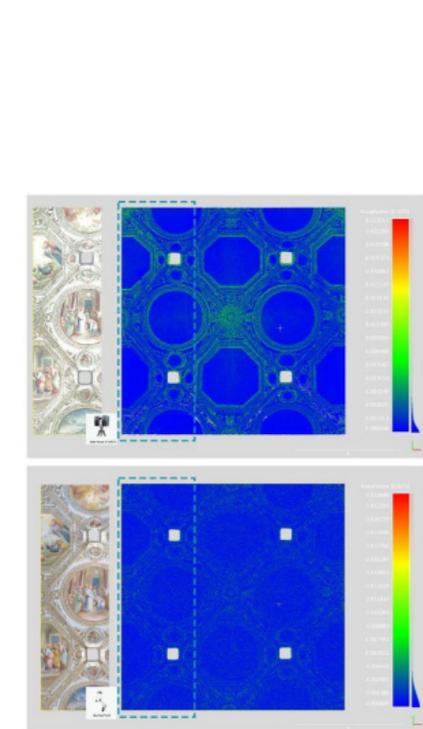
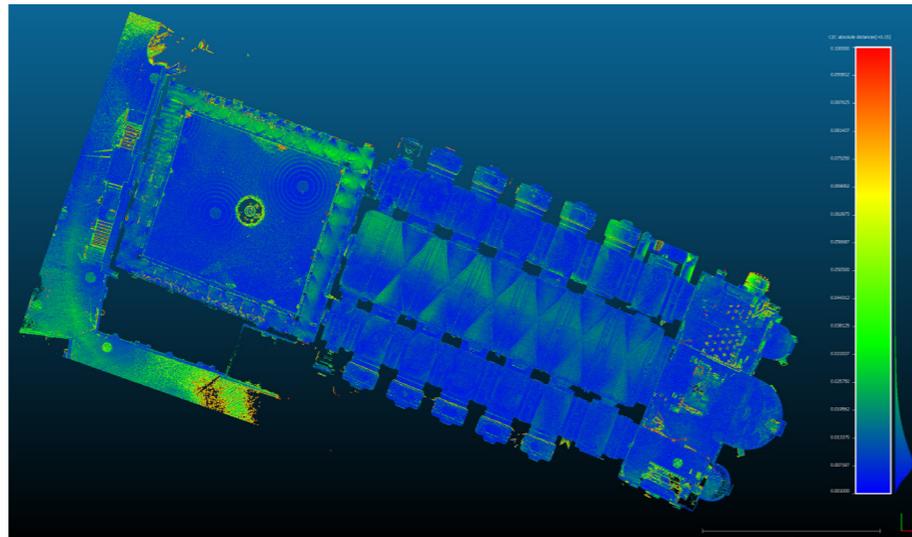


Fig. 123 - Valori di Roughness di una porzione di volta.



liminare della ricerca sono state condotte ulteriori analisi, incentrate sulla valutazione di ciascuna porzione dei due dataset acquisiti anche sull'ambiente ipogeo. Dopo il confronto tra nuvola/nuvola i due dataset sono stati messi a confronto nuovamente analizzando il livello di rumorosità e densità mediante gli algoritmi matematici implementati in *CloudCompare*.

In tal caso sono state prese in considerazione due aree delle Cripta della Cattedrale: una porzione dell'intradosso della volta caratterizzata da un forte apparato decorativo e posta in corrispondenza della scala che conduce alla Tomba del Santo Matteo e la statua di marmo a mezzo busto all'interno dell'oculo raffigurante il santo "San Giovanni Battista".

La prima analisi è stata effettuata su una porzione dell'intradosso della volta. Nel confronto, questo tipo di analisi ha riportato i seguenti risultati: la nuvola di punti del dataset laser scanner è caratterizzata da una rumorosità pari a 1.2 cm con una distribuzione omogenea dei punti mentre la nuvola di punti NavVis VLX ha valori di rumorosità leggermente superiori che si attestano intorno ad 1.8 cm con una distribuzione dei punti più rada ma che comunque consentono di leggere informazioni geometriche e di dettaglio. Nella seconda analisi si può osservare che la nuvola di punti VLX è caratterizzata da una densità maggiore e più omogenea (valore medio: ca 334 punti/Vsfera  $r=0,05$  m) rispetto la nuvola di punti laser scanner (Fig. 123).

Successivamente si è proceduto alla seconda ed ultima analisi sulla statua marmorea. In questo caso la nuvola di punti NavVis è caratterizzata da

valori di densità maggiori rispetto la nuvola di punti laser scanner (valore medio: ca 835 punti/V sfera  $r = 0,05$  m). Per tale valore è necessario tenere in considerazione la tecnica di acquisizione dinamica che ha permesso di poter registrare un maggior numero di dati tridimensionali. Per l'analisi della rumorosità della statua sono stati riscontrati valori pari a 4 mm per la nuvola NavVis e 6 mm per la nuvola laser scanner (Fig. 124).

I diversi confronti eseguiti sono risultati di fondamentale importanza per evidenziare come, ai fini di un monitoraggio continuo dell'architettura e di analisi previsionali che richiedono un continuo flusso di dati, sia necessario utilizzare strumentazioni *mobile mapping* che permettono di ridurre drasticamente i tempi di acquisizione con risultati molto accurati.

### 6.3 Costruzione del modello tridimensionale con sensori low-cost

La molteplicità dei temi che investono il campo della conservazione e del monitoraggio dei Beni Culturali richiede lo sviluppo di analisi e di metodologie di indagine sempre più avanzate. Una delle principali sfide che la comunità scientifica si è posta è quella di indagare nuove soluzioni per monitorare il patrimonio culturale, utilizzando alternative tecniche di rilievo con la sperimentazione di sensori low-cost. In questi ultimi anni gli effetti della rivoluzione digitale sono sempre più evidenti mediante lo sviluppo capillare di dispositivi tecnologici che, di fatto, hanno alterato le consuete tecniche di acquisizione, comunicazione e di percezione del reale. Nell'era della digitalizzazione e dell'industria 4.0 gli smartphone rappresentano una nuova frontiera rispetto ai tradizionali sensori utilizzati nelle discipline del rilievo e della rappresentazione quali laser scanner, *action cam*, fotocamere digitali, ecc. In tale contesto lo sviluppo tecnologico ha compiuto notevoli progressi grazie alla continua implementazione di processori multicore avanzati, fotocamere digitali sempre più performanti e sensori LiDAR integrati (*Light Detection and Ranging*) - come quelli incorporati nella versione PRO dell'iPad e dell'iPhone dell'Apple - che aprono nuove possibilità applicative alla realtà aumentata, alla realtà virtuale e alla ricostruzione tridimensionale (Santachiara et al., 2018; Scianna et al., 2019; Carrion-Ruiz et al., 2019; Spreafico et al., 2021). L'evoluzione digitale ha cambiato, dunque, totalmente le modalità di acquisizione e gestione dei dati con l'implementazione di sensori che hanno offerto soluzioni soddisfacenti sia dal

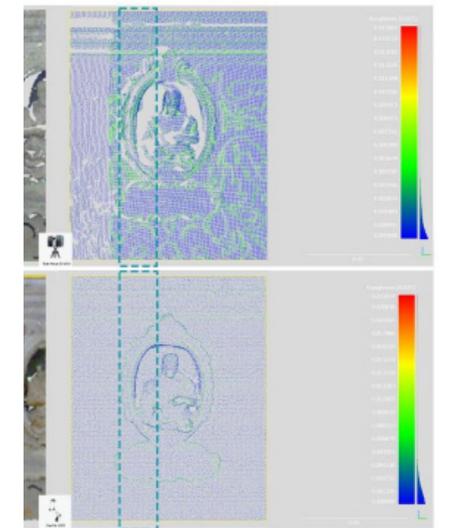


Fig. 124 - Valori di Roughness della statua.

punto di vista tecnico che tecnologico, riducendo in maniera evidente i tempi di lavoro e i costi delle strumentazioni. Partendo da tali premesse, la comunità scientifica, ha focalizzato l'attenzione anche sull'utilizzo di sensori *low-cost* finalizzati, in particolar modo, alle fasi di diagnostica e monitoraggio delle architetture che richiedono registrazioni di tipo continuo con tecniche di rilievo speditivo.

Tra le tecniche di rilevamento, considerate a basso costo, la fotogrammetria digitale, di tipo aerea e/o terrestre, è sicuramente la metodologia preferita e consolidata. Con il progresso tecnologico, anche gli *smartphone* e i *tablet* hanno sviluppato, in modo repentino, fotocamere integrate sempre più performanti e sensori non solo in grado di monitorare alcuni parametri del corpo umano quali ad esempio il battito cardiaco e il consumo calorico, ma, anche, di acquisire dati metrici e colorimetrici sempre più accurati. La loro attitudine a trasmettere dati in tempo reale li ha resi di grande interesse, soprattutto, nel settore architettonico speditivo. Con lo scopo, quindi, di esplorare nuove metodologie di *rapid mapping* è stato testato, in ambito architettonico il sensore LiDAR (*Light Detecting And Ranging*), recentemente integrato su *mobile devices* quali l'iPad Pro e l'iPhone 12 Pro della Apple.

Le scansioni digitali, elaborate dallo smartphone, sono state in seguito comparate con l'*output* prodotto dal rilievo fotogrammetrico di tipo terrestre, elaborato sullo stesso oggetto architettonico. Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile valutare le potenzialità di queste tecniche di acquisizione *low-cost* al fine di ipotizzare nuove soluzioni e strategie per la diagnostica e il monitoraggio continuo, funzionali anche ad analisi predittive del patrimonio architettonico.

	<b>Camera:</b> Sensor resolution: Sensor typology: Sensor dim: Max. resolution pixel: Focal length:	NikonD5000 12,3 MP CMOS 23,6 x 15,8 mm 7,62 cm 4.288 x 2.848 24 mm
	<b>Camera:</b> Sensor resolution: Sensor typology: Stabilizzatore ottico: Focal length:	Iphone 12 PRO 12 MP ultra-grandangolo f/2.4 grandangolo f/1.6 teleobiettivo f/2.0 Sì (fotocamera_1) 18 mm

Fig. 125 - Caratteristiche dei sensori utilizzati.

### 6.3.1 Rilievo fotogrammetrico: integrazione dei dati e confronto

I dati geometrico-dimensionali dell'oggetto di studio sono stati acquisiti integrando due sensori differenti. Questa metodologia non è totalmente nuova nel settore disciplinare del rilievo ma innovativo è l'utilizzo del sensore presente nello smartphone.

La campagna di rilievo è stata condotta con tecnica *image-based*, basata su algoritmi fotogrammetrici in cui il dato tridimensionale della facciata

è stato registrato con due tipi di strumentazioni low-cost: fotocamera digitale Nikon D5000<sup>8</sup> e iPhone 12PRO (Fig 125). In entrambi i casi, prima di procedere all'acquisizione dei fotogrammi, è stata pianificata la battuta fotografica e, per coprire l'intera facciata, sono stati previsti 15 punti di stazione per una distribuzione ottimale delle immagini. Tali immagini sono state registrate sia in formato RAW che JPEG, utilizzando, al contempo un treppiede fotografico al fine di ridurre le vibrazioni in fase di scatto. Infine, le caratteristiche principali dei due strumenti utilizzati insieme alle specifiche del processo fotogrammetrico sono riportati nella figura 3 e nella figura 4. Nella prima fase di rilievo, fissato un GSD (*Ground Sample Distance*) medio di 4 mm, è stata utilizzata una fotocamera Reflex Nikon D5000 con un obiettivo con lunghezza focale fissato a 24 mm per l'acquisizione del primo dataset, articolato in 229 fotogrammi. Per ottenere il riconoscimento dei punti omologhi, è stata garantita una sovrapposizione media tra i fotogrammi acquisiti di circa il 70% con tecnica di ripresa ad assi paralleli ed assi convergenti. Questa procedura ha permesso di recuperare informazioni spaziali su diversi livelli di profondità e di limitare gli errori di distorsione. A causa delle variabili condizioni di illuminazione è stato opportuno procedere ad una pre-elaborazione radiometrica delle immagini acquisite durante la prima battuta fotografica. L'elaborazione è stata effettuata utilizzando il software Metashape dell'Agisoft<sup>9</sup>, basato sull'uso di algoritmi di *image matching* per l'orientamento automatico dei fotogrammi. Per implementare il calcolo, è stato utilizzato il certificato di calibrazione della fotocamera in modo da raffinare i parametri di correzione dell'aberrazione interna dell'ottica. Dopo la fase di allineamento automatico dei fotogrammi, è stata generata la nuvola sparsa di 382,627 punti seguita dalla costruzione della nuvola densa di 31,781,783 punti. Le ultime due fasi del processo hanno visto la costruzione del modello tridimensionale texturizzato. Per l'intero workflow, ai fini del processamento dei dati, sono stati settati parametri di qualità media.

La seconda battuta fotogrammetrica ha visto come protagonista l'uso dello smartphone. Il nuovo *mobile device* Apple iPhone 12PRO è uno modelli *IOS* tecnologicamente più avanzato in commercio e dispone di un display da 6.1 pollici con una risoluzione di 2532 x 1170 pixel. La fotocamera è stata notevolmente integrata, rispetto ai modelli precedenti, con la riprogettazione di due dei tre sensori presenti all'interno del modulo

Facade of the Cathedral of San Matteo			
	n.points	n.faces/vertices	setting
 A (229 photos)	sparse clude	382,627	medium
	dense clude	31,781,783	medium
	mesh	6,356,347	high
	texture	3,187,380	high
 B (215 photos)	n.points	350,457	medium
	sparse clude	29,659,773	medium
	dense clude	5,732,699	high
	mesh	2,785,147	high
texture			high

Fig. 126 - Risultati del processo fotogrammetrico in Metashape - Agisoft.

fotografico posteriore. L'obiettivo grandangolare è stato migliorato ed è dotato di una lente a sette elementi con apertura  $f / 1.6$  in grado di catturare il 27% di luce in più ed in questo caso è stato integrato il sensore di stabilizzazione ottica, una tecnologia riservata alle reflex digitali. Invece, l'ultra-grandangolare con apertura  $f/2.4$  e angolo di campo  $120^\circ$ , offre la possibilità di effettuare scatti con la modalità notturna (<https://www.Apple.com>).

Per la registrazione dei fotogrammi lo smartphone è stato impostato in modalità manuale, con lunghezza focale di 18 mm. Ripercorrendo i medesimi punti di stazione si è proceduti alla registrazione di 215 immagini con le consolidate regole di sovrapposizione. La successiva fase di elaborazione ha seguito la pipeline fotogrammetrica descritta già in precedenza, settando ancora una volta parametri di qualità media e dal processamento delle immagini è stata ottenuta una nuvola di punti sparsa di 350,457 punti ed una nuvola di punti densa di 29,659,773 punti (Fig. 126).

### 6.3.2 Analisi e comparazione

Completate le fasi di processamento del dato tridimensionale, i risultati ottenuti dai due differenti sensori utilizzati sono stati esaminati a diverse

Fig. 127 - In alto: dataset acquisito con macchina fotografica. In basso: dataset acquisito con smartphone.

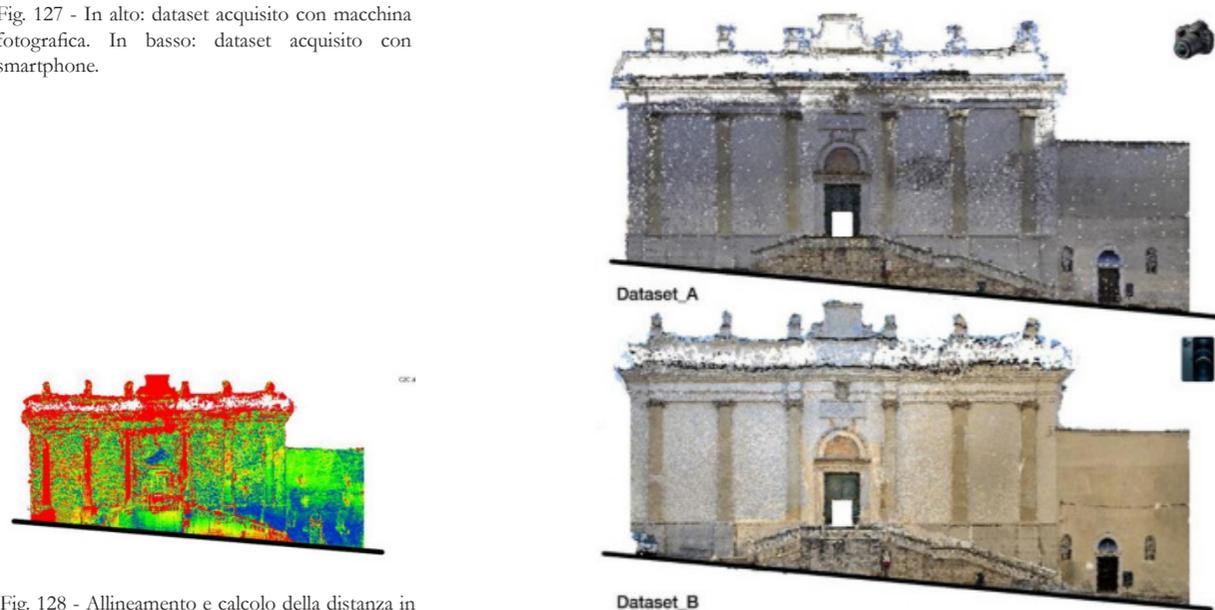


Fig. 128 - Allineamento e calcolo della distanza in CC.

scale di dettaglio, con la comparazione delle due nuvole dense, dal generale al particolare. In quest'ultimo caso è stata analizzata come porzione una piccola area dello stipite marmoreo comprendente anche la statua del leone, posto alla sinistra del portale di accesso.

Una prima fase di valutazione dei modelli 3D è stato frutto di una analisi critica eseguita dagli autori in cui sono stati evidenziate alcune mancanze. Difatti, in entrambe le nuvole di punti, come immaginato, sono state riscontrate delle zone incomplete sulla parte soprastante la trabeazione, che non è stata processata dal software, e tale mancanza è dovuta al ristretto spazio di acquisizione e all'altezza elevata della facciata. Inoltre, una piccola parte del dataset da iPhone 12PRO non è stata acquisita a causa di alcuni veicoli che ostruivano la visuale. Migliori le caratteristiche colorimetriche della nuvola fotogrammetrica acquisita da smartphone (Fig. 127).

Considerando l'obiettivo del lavoro di tesi, per le operazioni di comparazione tra le due strumentazioni, la prima analisi è stata effettuata allineando e calcolando la deviazione tra la nuvola acquisita da fotocamera digitale NikonD5000 (A) e quella acquisita da iPhone 12PRO (B). Il processo di allineamento è stato svolto nell'applicativo open source *CloudCompare* ove è stato necessario allineare il dataset fotogrammetrico B al dataset A, utilizzato come nuvola di riferimento per la procedura di registrazione con l'algoritmo ICP (*Interactive Closest Point*). Per la procedura di allineamento sono stati collimati manualmente dieci punti omologhi, caratteristici della facciata e disposti su più livelli del piano. A questo punto è stata applicata una rototraslazione rigida riscontrando un errore di allineamento RMSE (Root Mean Square Error) tra i due set di dati pari a 0.04 m. Infine, sono stati calcolati i valori di distanza nuvola/nuvola. Questo primo confronto ha mostrato delle discrepanze nella parte superiore della trabeazione, dovuta alla difficoltà in fase di ripresa dei fotogrammi, e un'aderenza compresa nei 2 cm per il resto della facciata (Fig. 128).

Successivamente, sono state estrapolate due sezioni trasversali in cui ciascun profilo è corrispondente alla nuvola dei punti generata dai due sensori. In entrambi i casi possiamo essere soddisfatti del risultato ottenuto e notare come la nuvola acquisita da smartphone (in rosso) sia abbastanza uniforme al profilo della nuvola fotogrammetrica, acquisita da fotocamera reflex (in blu), riscontrando solo in prossimità delle parti angolari delle colonne e delle paraste una minore precisione geometrica (Fig. 129).

Come ultima analisi, è stato analizzato il livello di rumorosità, tool imple-

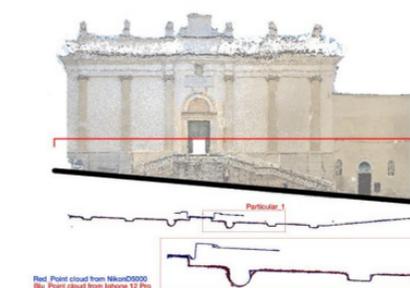


Fig. 129 - Comparazione dei due dataset acquisiti.

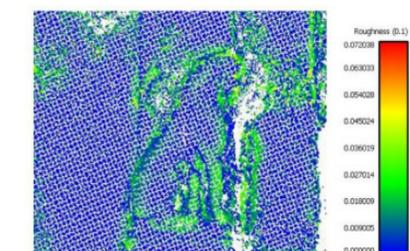
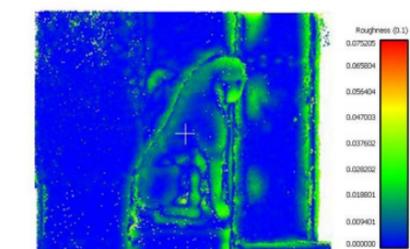
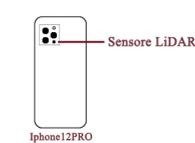


Fig. 130 - Valori di Roughness. dataset A e dataset B.

mentato in *CloudCompare*, sulla stessa porzione delle due nuvole e, ancora una volta, i due dataset sono stati messi a confronto. Con questa funzione sono state calcolate le distanze di deviazione di campioni di punti con il valore di  $r=0.1$  m. Nel confronto, questo tipo di analisi ha riportato i seguenti risultati: la nuvola di punti A è caratterizzata da una rumorosità pari a 1.2 cm con una distribuzione omogenea dei punti mentre la nuvola di punti B ha valori di rumorosità leggermente superiori che si attestano intorno ad 1.8 cm con una distribuzione dei punti più rada ma che comunque consentono di leggere informazioni geometriche e di dettaglio (Fig. 130).

#### Scanner LiDAR



Modello: iPhone12PRO  
Distanza: max 5metri  
Laser: VCSEL  
Laser: SPAD

Fig. 131 - Caratteristiche dei sensori utilizzati.

### 6.4 Sensori Lidar Low-Cost: sperimentazioni in corso

L'ultima fase di acquisizioni sul campo ha visto l'utilizzo del LiDAR attualmente integrato sui dispositivi Apple.

Prima di procedere alle fasi di acquisizione dei dati *in situ* è stato opportuno valutare, ancora una volta, le caratteristiche sia tecniche che tecnologiche dei sensori impiegati ai fini della ricerca. In tal caso, il rilievo condotto sul caso studio ha visto l'impiego di due specifiche metodologie *image based* e *range based* con strumentazioni però di tipo *low-cost*, ovvero una fotocamera digitale Nikon D5000 e uno smartphone Iphone 12PRO. Per la tecnica *image based* il dataset fotografico è stato registrato con fotocamera digitale Nikon D5000 con sensore CMOS, con dimensione delle immagini di 23,6 X 15,8mm, risoluzione 12,3 megapixels ed obiettivo AF-S DX NIKKOR 18-55mm. Invece, per la tecnica *range based*, nell'ambito di questa ricerca, ci si è avvalsi del sensore LiDAR, implementato su smartphone. Nell'ultima versione PRO del modello di casa Apple, è stato, difatti, integrato questo sensore a stato solido che si compone di due elementi principali: un trasmettitore ed un ricevitore, rilevando distanze massime fino a 5 metri sia in ambienti outdoor che indoor. Il sensore che trasmette è un *array VCSEL* (*vertical cavity surface emitting lasers*) mentre il sensore che riceve è di tipo SPAD (*single photon avalanche diodes*). Combinando le informazioni in *real time* è possibile leggere, tramite app, la scansione ottenuta discretizzata sottoforma di maglia triangolare (Fig. 131).

Per le fasi di acquisizioni del dato, inizialmente, è stato effettuato un rilievo fotogrammetrico terrestre dell'intero Quadriportico utilizzando una fotocamera digitale Nikon D5000. La presenza dell'ambiente porticato ha,

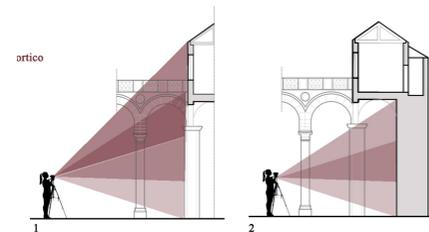


Fig. 132 - Acquisizione dati per il processo fotogrammetrico.

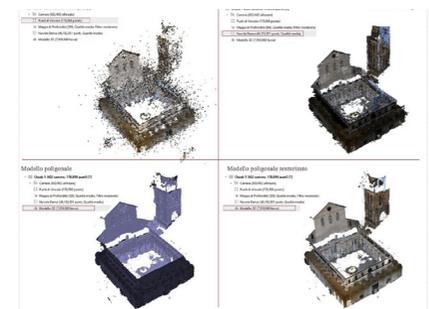


Fig. 133 - Risultati del processo fotogrammetrico in Metashape – Agisoft.

però, richiesto un'importante fase di pianificazione della battuta fotografica, al fine di evitare punti ciechi e zone d'ombra. Per questo motivo il dataset fotografico è stato suddiviso in relazione agli elementi:

- i)prospetti
- ii)sottoportico
- iii) colonne interne ed esterne;

In totale, sono stati acquisiti 602 fotogrammi, in cui è stato garantito un *overlap* delle immagini di circa il 60% e, in relazione alla conformazione degli spazi, si è deciso di settare la lunghezza focale a 24 mm integrando riprese sia ad assi paralleli che ad assi convergenti. Per il rilievo delle colonne è stato, invece, necessario scattare 5 immagini percorrendo, per ogni colonna, un semicerchio (Fig. 132). Successivamente, il processamento delle immagini è stato effettuato con l'applicativo *structure from motion* dell'Agisoft - *Metashape* ove in tutte le fasi di lavori sono stati impostati parametri di media qualità. In linea con il *workflow* fotogrammetrico, dopo le fasi di allineamento è stata estratta la nuvola sparsa di 178,898 punti. Con il riconoscimento dei punti omologhi è stato possibile ottenere, con algoritmi di *dense image matching*, il modello poligonale texturizzato, costituito da una maglia triangolare di 7,959,089 facce (Fig. 133).

In seguito alla valutazione delle caratteristiche tecnologiche della strumentazione presa in esame, per l'acquisizione delle scansioni da smartphone, il rilievo è stato condotto esclusivamente sul lato del nartece del Quadriportico e poi, per un maggiore dettaglio, sugli elementi architettonici della porta medievale e del sarcofago di Guglielmo d'Altavilla, presenti sempre su questo lato del Quadriportico. In realtà, durante la fase di registrazione dei dati Lidar scanner, in prossimità della porta d'ingresso della Chiesa, vi è erano diversi oggetti, che impedivano il passaggio creando problemi durante la fase di ripresa. Pertanto, ai fini della comparazione, questo lato non è stato oggetto di valutazione. L'obiettivo principale è stato quello di individuare potenzialità e limiti di questo sensore per cui, le diverse scansioni sono state registrate con parametri di risoluzione sia *high res* che *low res*, settando di volta in volta i valori tramite l'app utilizzata, ossia *3DScanner*<sup>11</sup>. Camminando con passo moderato e tenendo in mano lo smartphone, con il sensore rivolto verso l'architettura, sono state raccolte le informazioni spaziali. In prossimità del colonnato è stato opportuno ruotare intorno ad ogni colonna cercando di inquadrare con più precisione le parti

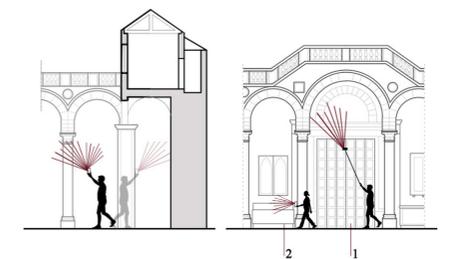


Fig. 134 - Acquisizione dati con LiDAR low-cost.

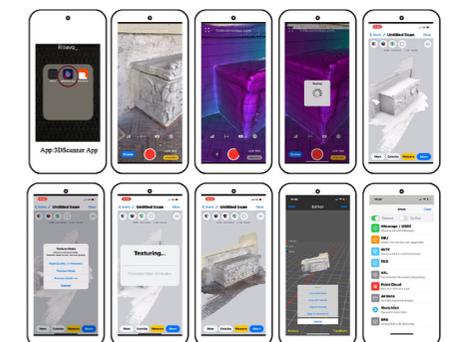


Fig. 135 - Processamento dei dati con app 3D Scanner.

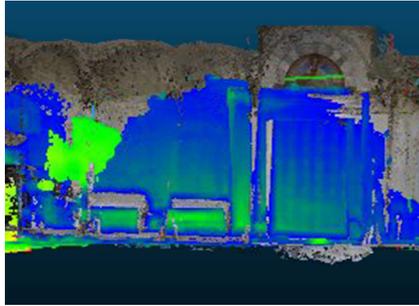


Fig. 136 - Confronto dei dataset. Allineamento e calcolo della distanza in CC.

del basamento e del capitello mentre, il soffitto voltato del portico non è stato rilevato dal sensore poiché posto a quota superiore di 5 metri. Per ovviare a questo problema ed acquisire anche la lunetta con arco a tutto sesto posta al di sopra della porta di bronzo, lo smartphone è stato montato su asta telescopica. In 8 minuti è stata portata a termine la registrazione del lato del narcece. Per il monumento funebre e la porta medievale sono state effettuate, in circa 6 minuti, altre due scansioni. Successivamente, sempre attraverso l'app, si è proceduti all'elaborazione delle texture e, in tal caso, i parametri sono stati nuovamente regolati in funzione delle dimensioni dell'oggetto acquisito. È necessario precisare che tale processo ha occupato uno spazio su *storage* di 3GB e un tempo di elaborazione di circa 22 minuti per la scansione dell'intero ambiente mentre l'elaborazione delle texture sulle parti di dettaglio hanno impiegato 5 minuti. Queste ultime due fasi hanno ridotto notevolmente la percentuale di batteria per l'alto carico computazionale. Infine, le scansioni sono state esportate nei differenti formati disponibili presenti nell'applicazione (Figg. 134-135).

Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile effettuare un primo confronto tra le due metodologie *low cost* prese in esame. Allo scopo di valutare l'accuratezza dei due sistemi è importante tenere in considerazione anche la modalità in cui i dati sono stati acquisiti. Difatti, mentre per la prima metodologia si è seguito una tecnica di ripresa precisa, per il dispositivo mobile i dati sono stati registrati in movimento spostandosi liberamente da una parte all'altra. Il primo confronto, ha visto come oggetto di analisi il lato del narcece, e la comparazione delle points clouds è avvenuta all'interno del software open source *Cloud Compare*, integrando in un unico modello l'output del rilievo fotogrammetrico con la nuvola di punti prodotta dalla scansione LiDAR. Il dataset fotogrammetrico è stato scelto come "reference" per la procedura di registrazione con l'algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) e, a partire dalla collimazione dei punti omologhi visibili in ciascuna scansione nelle aree di sovrapposizione tra due, sono stati calcolati successivamente i valori di distanza. Il risultato del calcolo *cloud2cloud* ha mostrato, nella parte evidenziata oggetto di analisi, un'ampia area di sovrapposizione tra i datasets con un errore medio di 0.15m. Parallelamente, con la stessa procedura, sono stati confrontati gli elementi di dettaglio sia della porta di bronzo che del sarcofago. In tal caso l'allineamento finale delle nuvole di punti ha portato a risultati molto più soddisfacenti in termini di accuratezza del dato metrico con un valore distanza max contenuto nei 2 cm nonostante i ridotti tempi della fase di acquisizione (Fig. 136).

## 6.5 Osservazioni

Tenendo conto che ad oggi la tecnologia LiDAR implementata su smartphone è realizzata principalmente per applicazioni di realtà aumentata e non ancora con finalità di tipo conoscitivo-architettonico, i risultati ottenuti da questa prima sperimentazione sono nel complesso piuttosto soddisfacenti, soprattutto considerando le dimensioni ridotte del sensore e la portabilità del dispositivo. Sicuramente è necessario valutare che l'accuratezza del dato Lidar non è ancora ottimale per gli ambienti di notevoli dimensioni così come nel caso del lato del narcece, mentre può ritenersi soddisfacente per gli oggetti di dimensioni ridotte. Le tecniche esaminate potrebbero essere integrate l'una con l'altra ma, naturalmente, occorre tener sempre presente la finalità del rilievo da dover effettuare. Ad esempio, per le fasi di diagnostica e monitoraggio, ove è richiesta una tecnica di *rapid mappig* continua, la metodologia LiDAR con sensori come quelli usati in questa applicazione può fungere solo da supporto a tecniche consolidate, come ad esempio la fotogrammetria digitale. Allo stesso tempo, però, possiamo supporre che rapidi sviluppi tecnologici ulteriori, riguardanti la miniaturizzazione e la migliore performance in termini di accuratezza, consentiranno molto presto nuovi e interessanti scenari applicativi con strumenti portatili efficaci per il rilievo.

## Note

1-<https://www.faro.com/it-IT/404>.

2 - In dettaglio, ad ogni punto, oltre alle coordinate spaziali (x,y,z) e colorimetriche (rgb), si registra anche il valore di riflettanza che esprime la capacità di un oggetto di riflettere il raggio laser e, dunque, il valore varia a seconda della natura del materiale di cui si compone la superficie dello stesso.

3- Ogni punto del manufatto acquisito è stato battuto 4 volte con una durata complessiva di ogni scansione pari a 7 minuti circa.

4- <https://www.navvis.com/blog/get-it-done-with-navvis-vlx-2nd-generation-mobile-mapping-system>.

5- Questo tipo di strumentazione a scansione dinamica è almeno dieci volte più veloce di un sistema a scansione statica. NavVis VLX effettua misurazioni 3D con una configurazione comprovata - due sensori LiDAR multistrato e un algoritmo SLAM proprietario - per fornire nuvole di punti di livello topografico. Inoltre, la fotografia panoramica è resa possibile grazie a quattro fotocamere da 20 MP posizionate sulla parte

superiore del dispositivo, che acquisiscono immagini ad alta risoluzione in ogni direzione senza che l'operatore ostruisca il campo visivo.

Si ringrazia l'azienda 3D SCAN per la possibilità di aver potuto utilizzare il software proprietario IVION.

6- <https://www.danielgm.net/cc/>

7 - <https://global.techradar.com/it-it/news/lidar-iphone-cose-a-cosa-serve-come-funziona>; <https://www.dday.it/redazione/37309/lidar-iphone-12-pro-ios-ipad>; [https://www.apple.com/it/store?afid=p238%7CsqcuGjJQ-dc\\_mtid\\_187079nc38483\\_pcrd\\_649763362715\\_pgrid\\_13999328567\\_pntwk\\_g\\_pchan\\_\\_pexid\\_\\_&cid=aos-it-kw-go-brand--slid--bran-product-](https://www.apple.com/it/store?afid=p238%7CsqcuGjJQ-dc_mtid_187079nc38483_pcrd_649763362715_pgrid_13999328567_pntwk_g_pchan__pexid__&cid=aos-it-kw-go-brand--slid--bran-product-);

8 - [https://www.nikon.it/it\\_IT/product/discontinued/digital-cameras/2012/d5000](https://www.nikon.it/it_IT/product/discontinued/digital-cameras/2012/d5000)

9- <https://www.agisoft.com/>

10- Ogni fotogramma è stato acquisito percorrendo un semicerchio a 0°, 45°, 90°, 135° e 180°.

11- <https://apps.apple.com/it/app/3d-scanner-app/id1419913995>.

12- A conclusione di questo capitolo si riportano tutte le pubblicazioni condotte dall'autrice durante il triennio di dottorato: i) Campi M., Falcone M., Sabbatini S. (2022). "Towards continuous monitoring of architecture. Terrestrial laser scanning and mobile mapping system for the diagnostic phases of the cultural heritage" in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVI-2/W1-2022, 121-127, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-2-W1-2022-121-2022>, 2022; ii) Falcone M., Campi M. (2021). Il Quadriportico della Cattedrale di S. Matteo: sensori low cost per rilievi di rapid mapping/ The Quadriportico of the Cathedral of S. Matteo: Low-cost Sensors for Rapid Mapping Surveys in Arena A., Arena M., Mediatì D., Raffa P. (a cura di). *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/ Connecting. Drawing for weaving relationship. Languages Distances Technologies. Proceedings of the 42th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2283-2300. ISBN 9788835125891; iii) Campi M., di Luggo A., and Falcone M. (2021). Photogrammetric processes and augmented reality applications using mobile devices in international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences., XLVI-M-1-2021, 101–106, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-101-2021>, 2021; iv) FALCONE M., Origlia A., Campi M., Di Martino S. (2021). From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data management for cultural heritage conservation with Digital Twins in international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, XLIII-B4-2021, 47–53, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2021-47-2021>, 2021.

Fig. 137 - Cartografia del patrimonio monumentale del centro storico di Salerno



Fig. 138: Pianta delle coperture. Elaborazione grafica a cura dell'arch. Marika Falcone.



Fig. 139: Pianta piano terra della Cattedrale (+1.50 m)

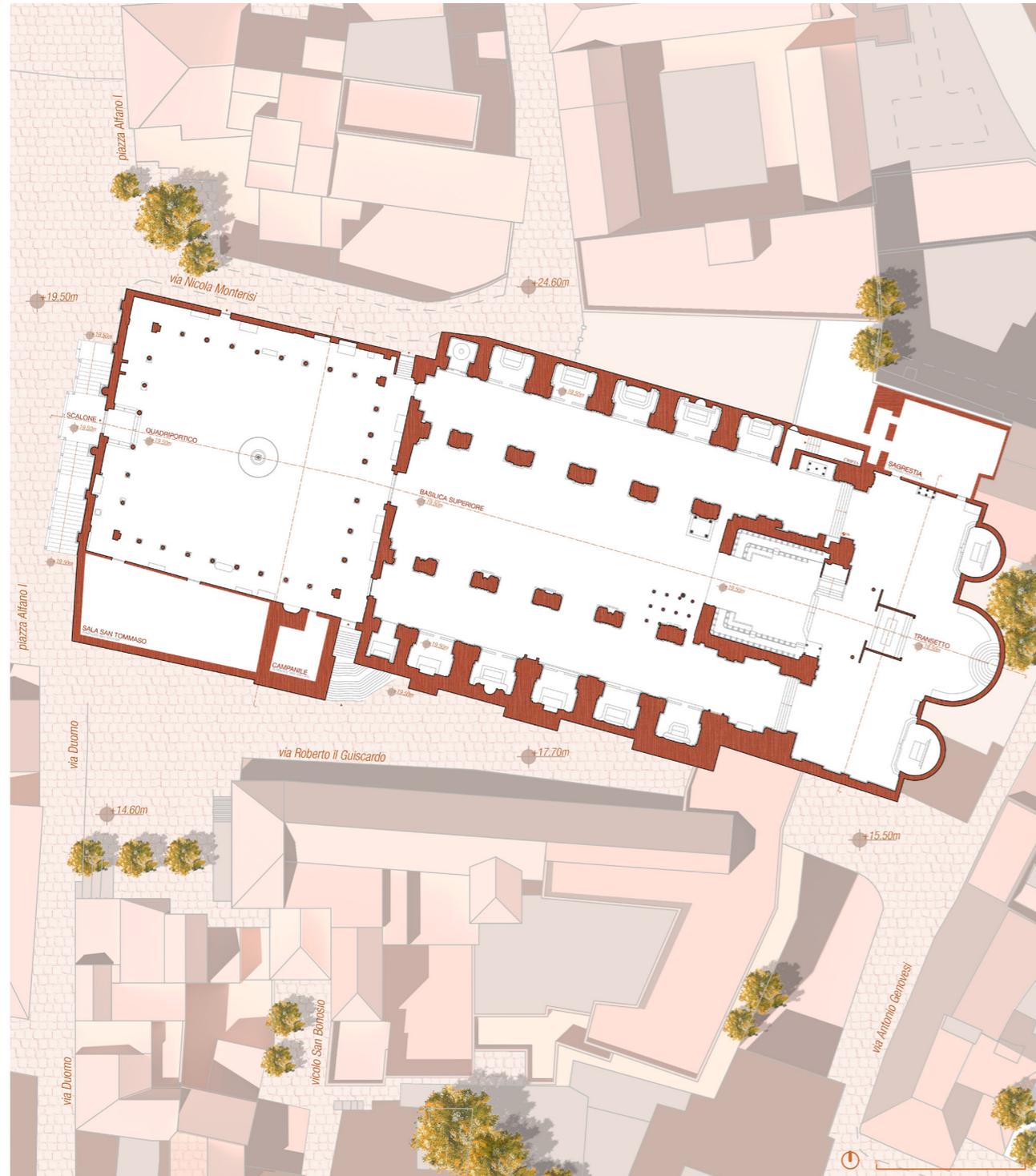
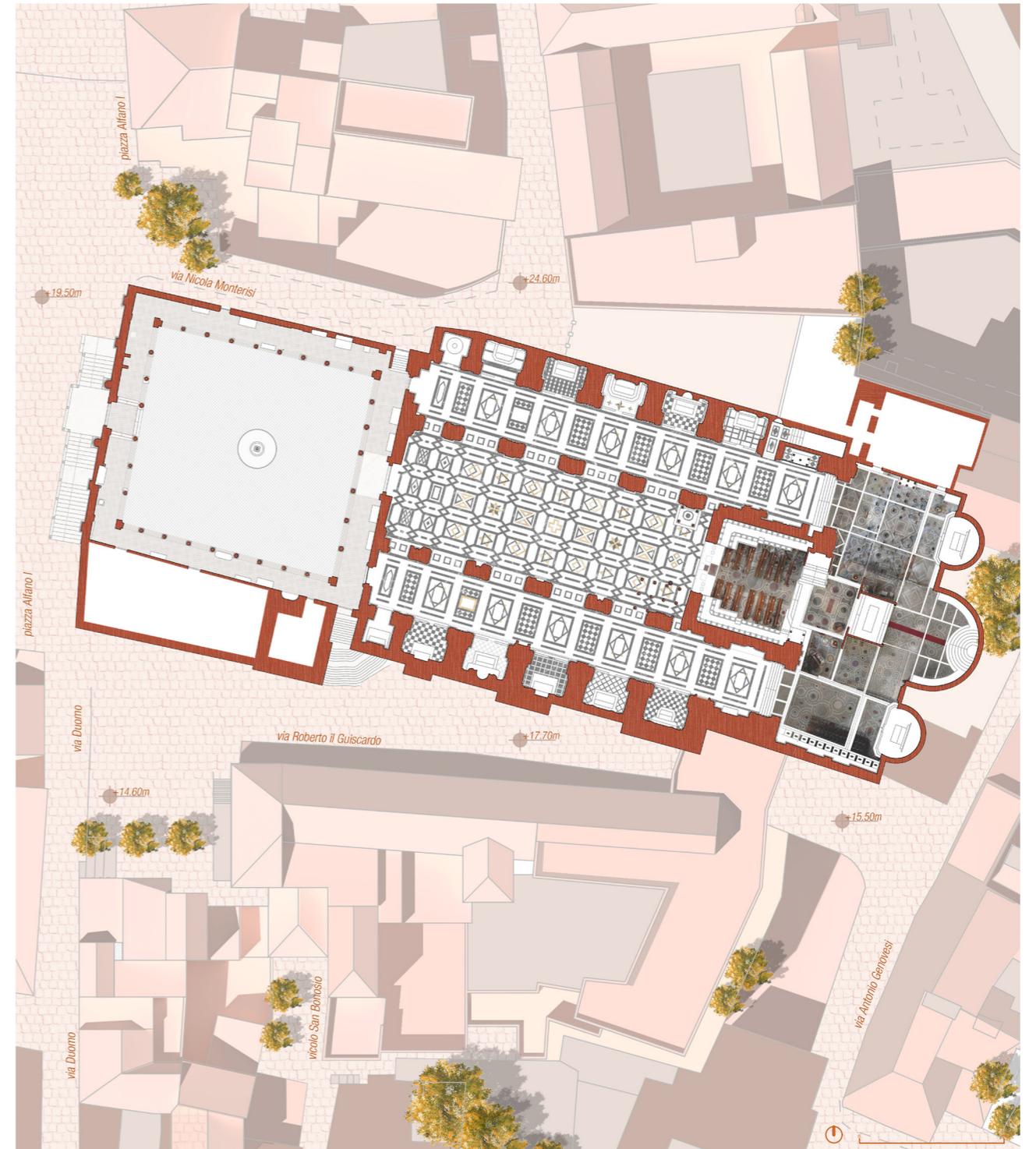


Fig. 140: Pianta delle pavimentazioni della Cattedrale.



Figg 141, 142 - Dettaglio della pavimentazione della navata centrale, settentrionale e meridionale (a sinistra); Dettaglio della pavimentazione del Transetto (a destra).

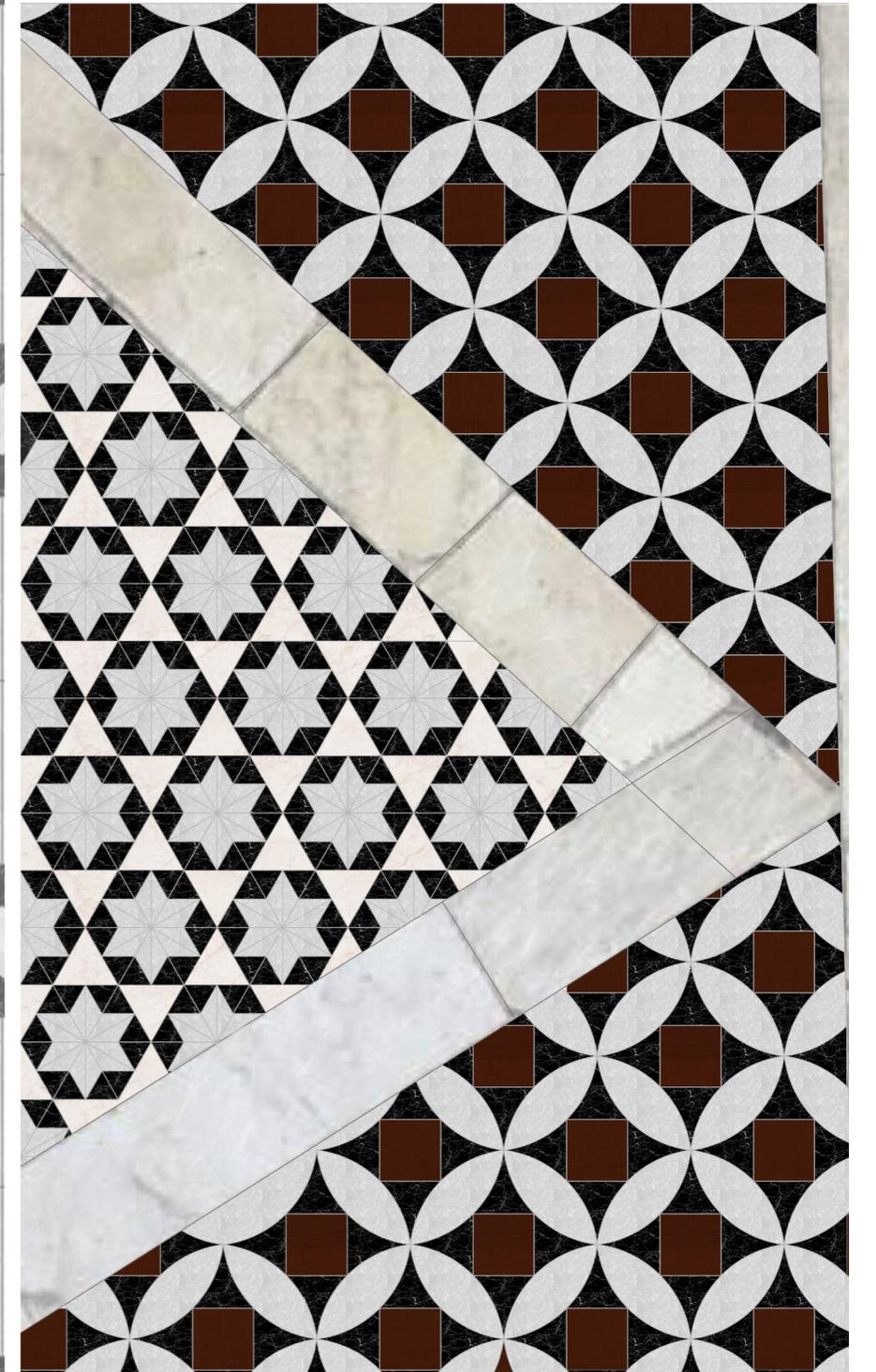
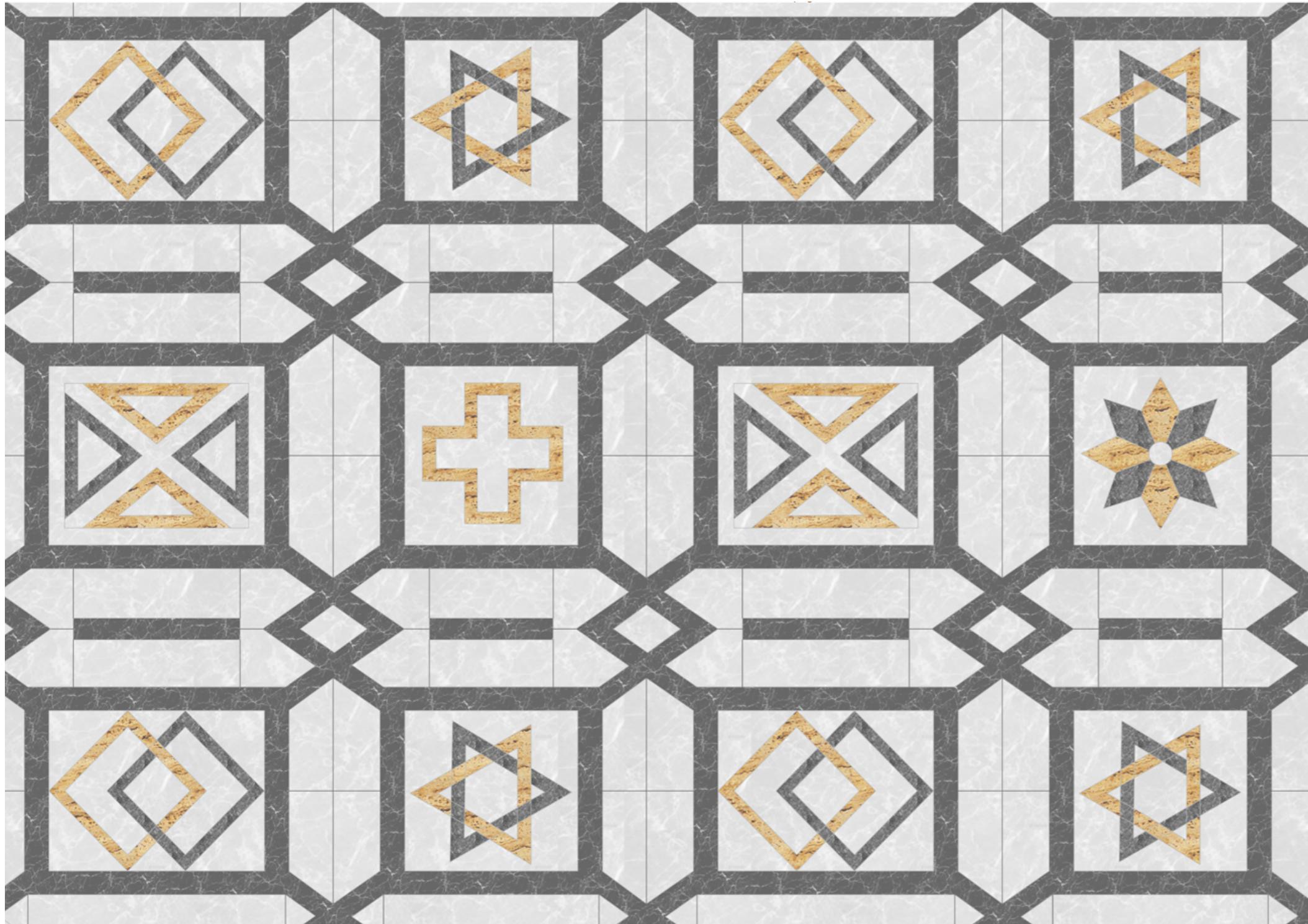


Fig. 143: Ipografia della Cattedrale

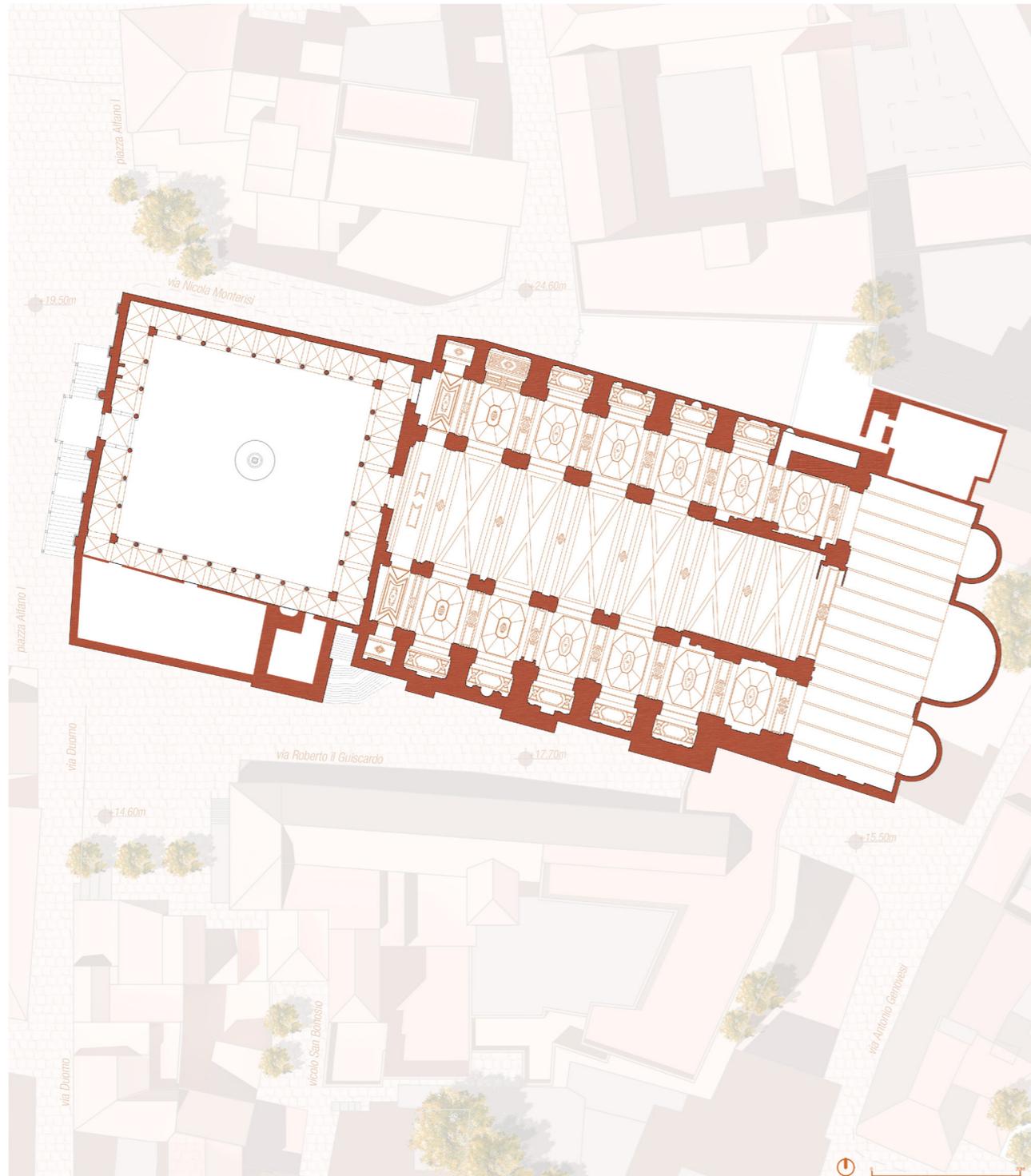


Fig. 144- Pianta piano interrato della Cripta (-4.65 m)

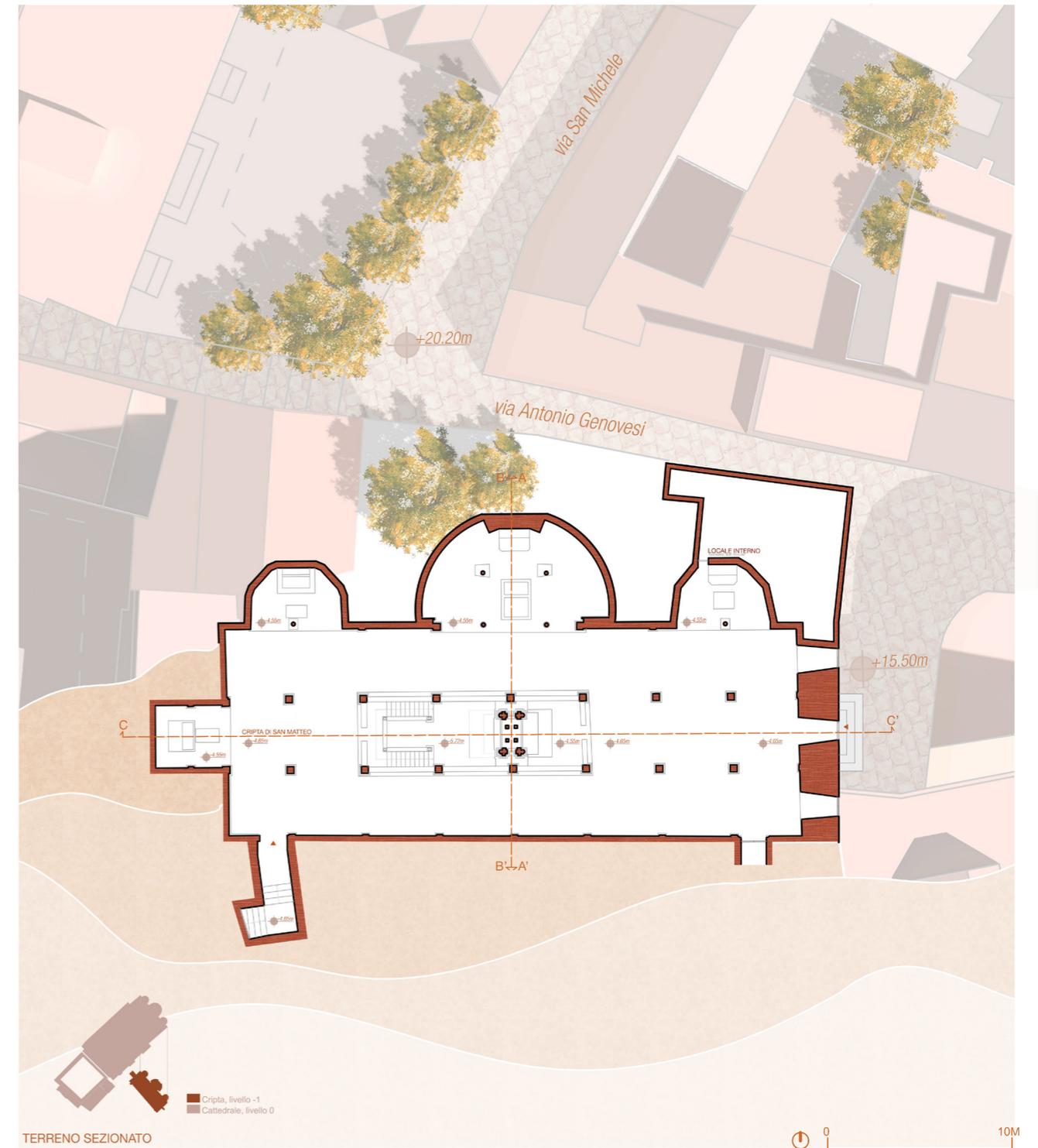


Fig. 145 - Pianta della pavimentazione della Cripta

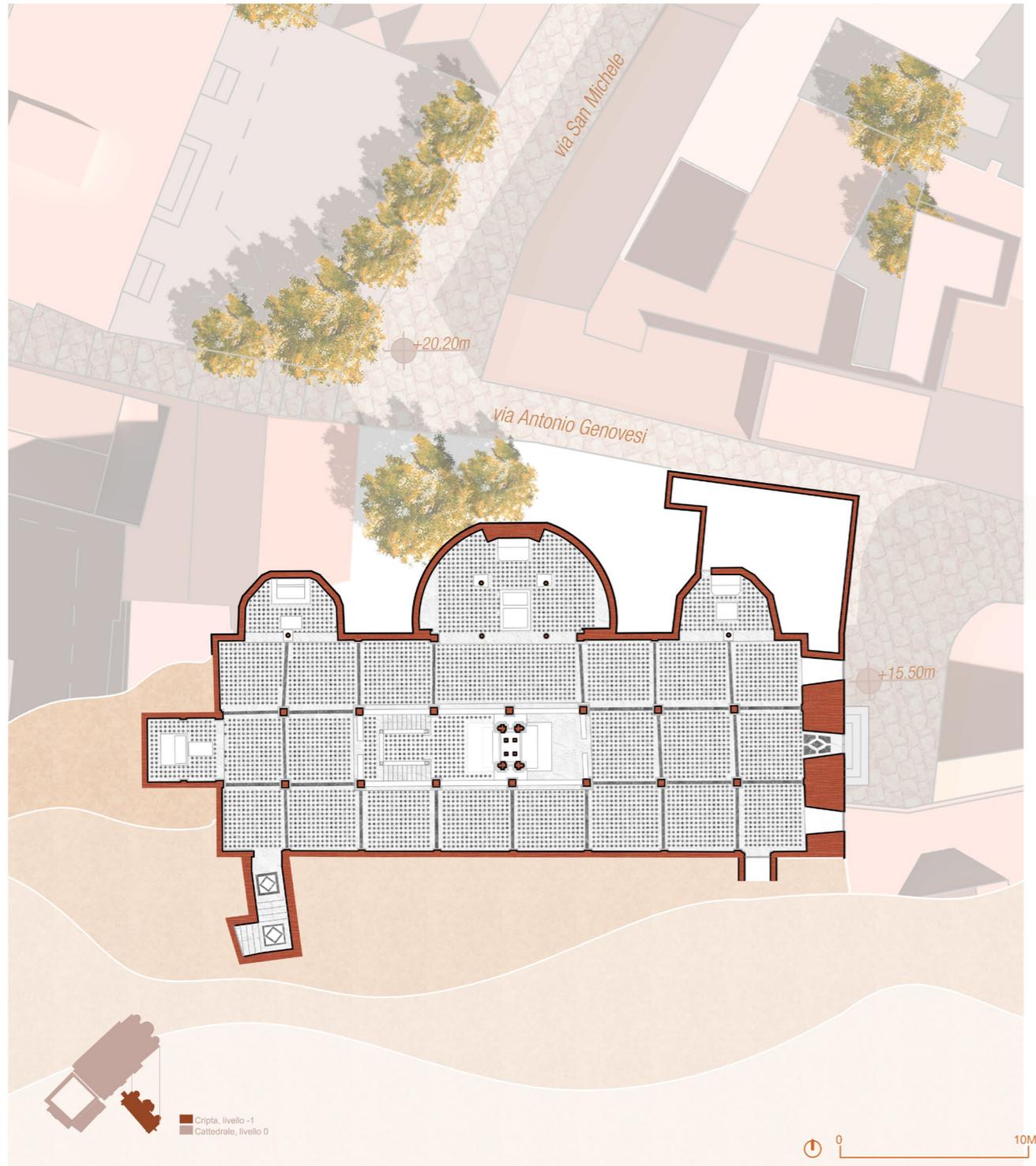


Fig. 146 - Ipografia della Cripta.

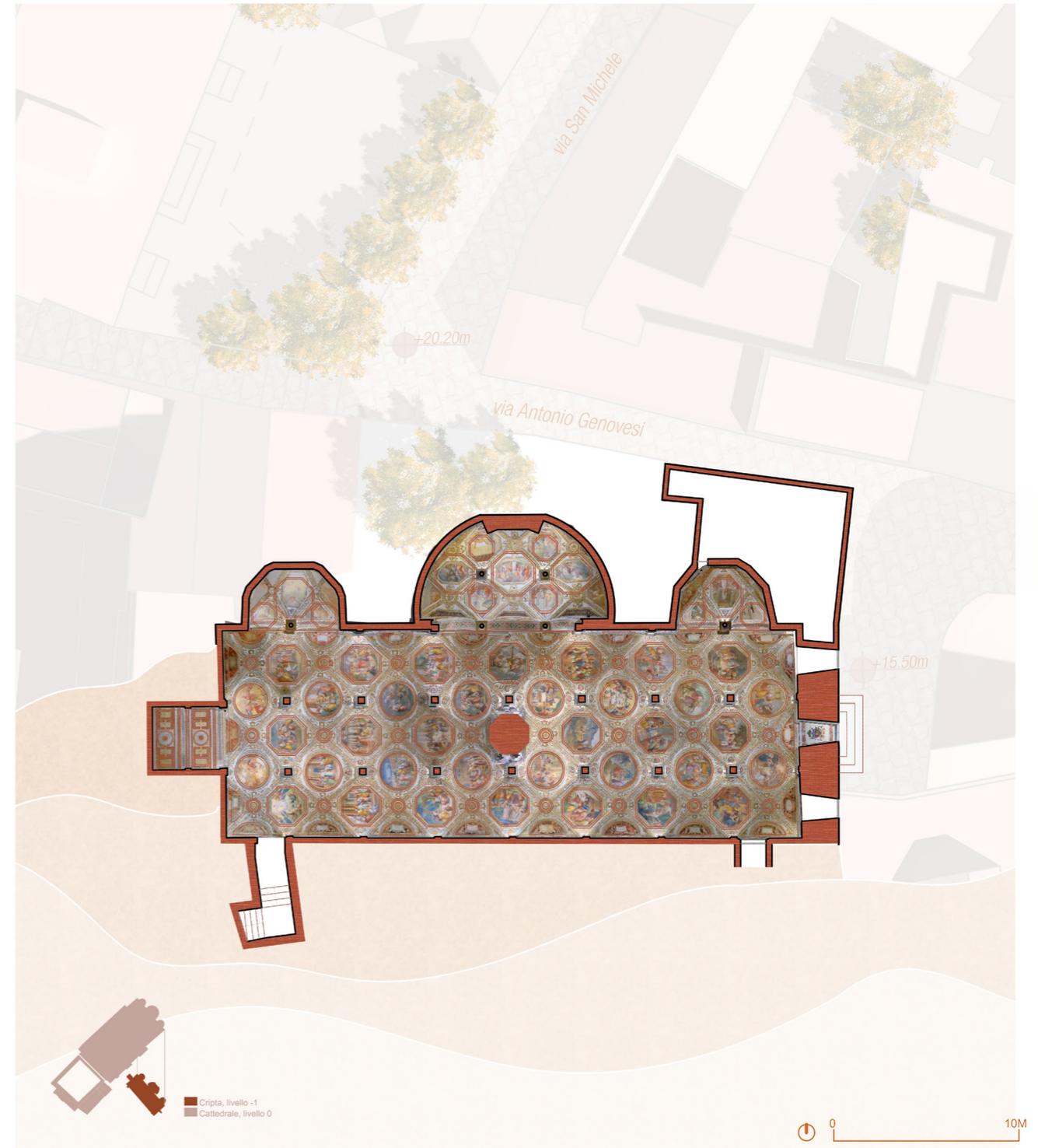


Fig. 147: Sezione AA

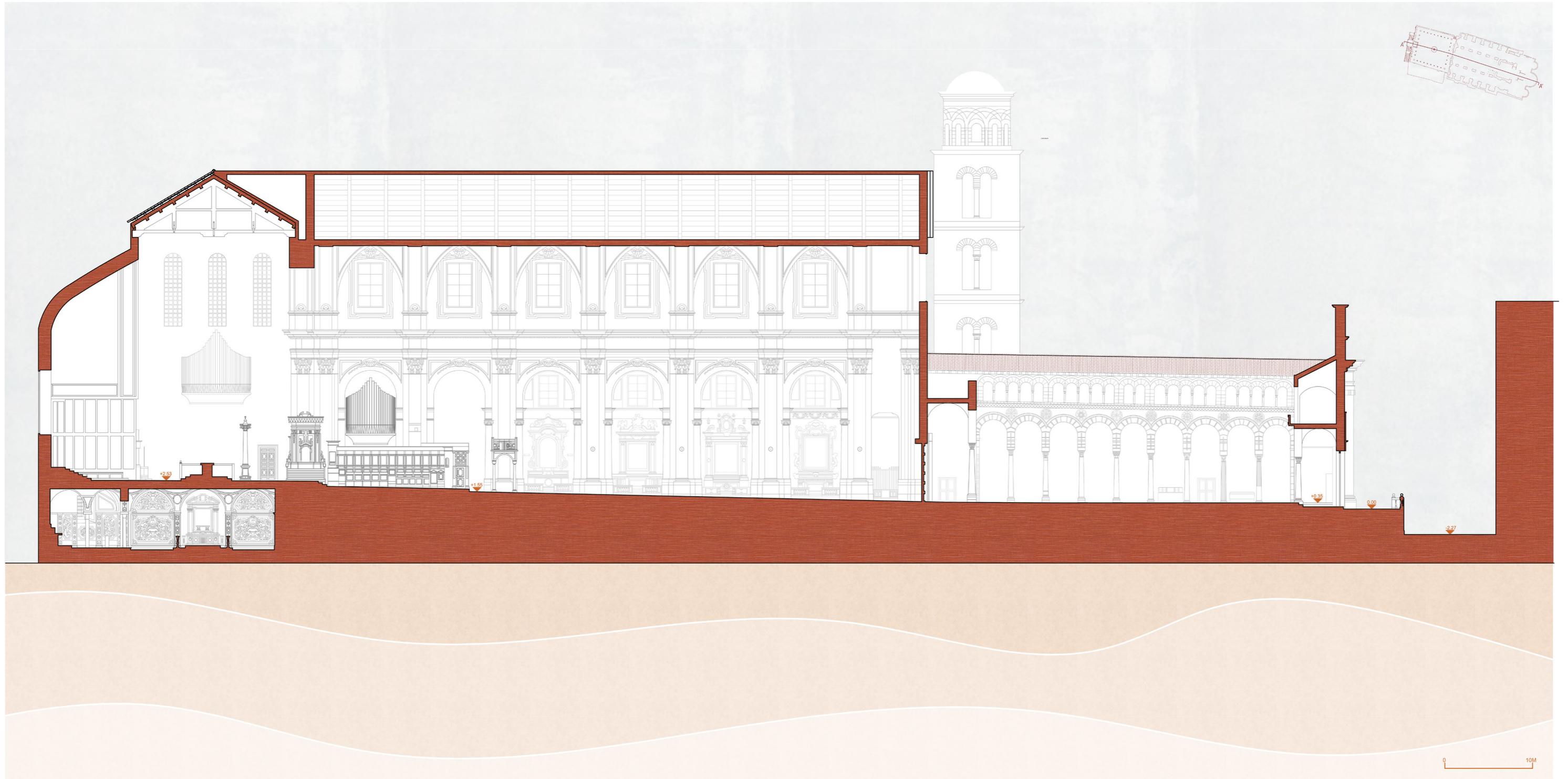


Fig. 148: Sezione BB

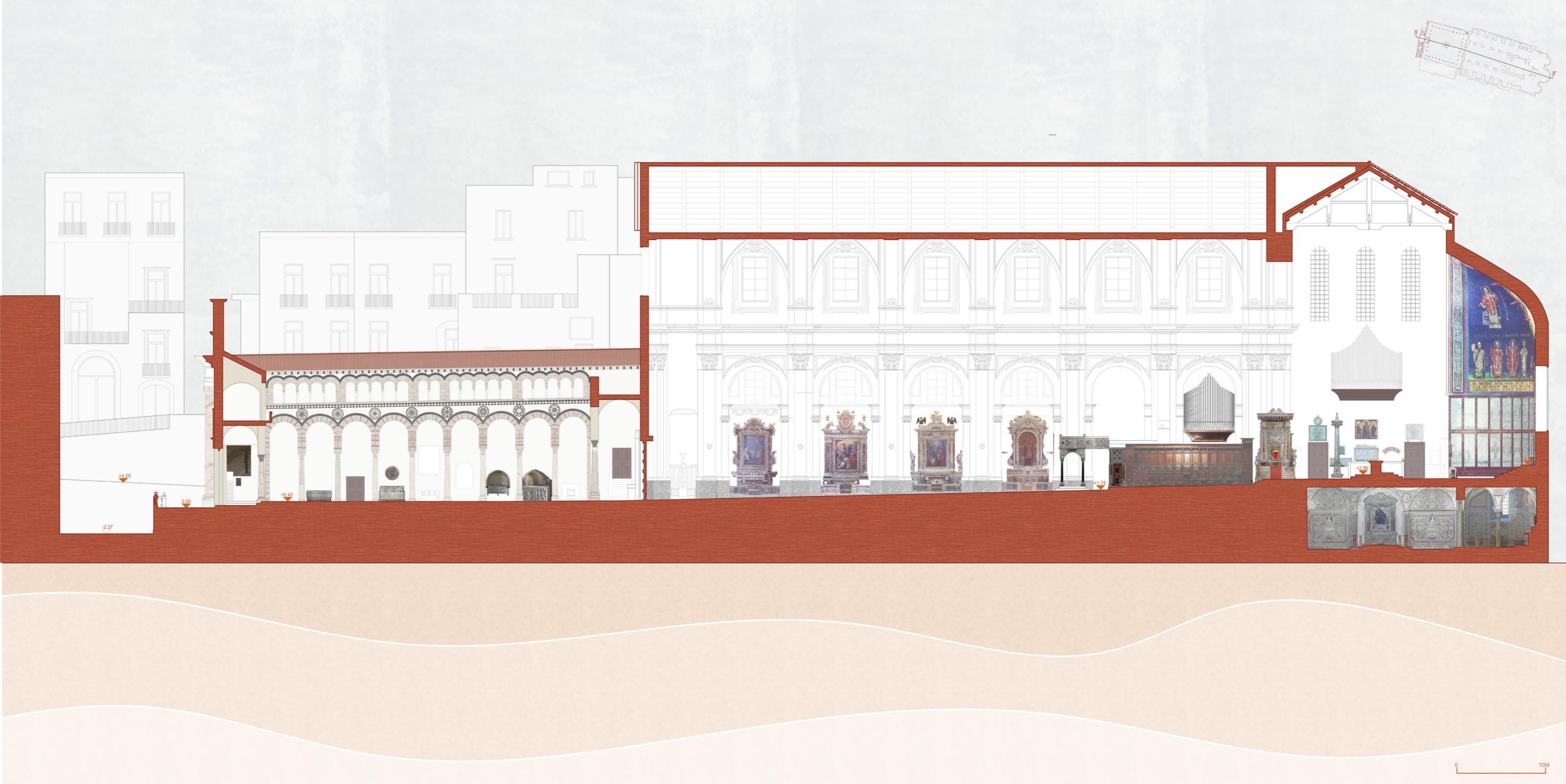


Fig. 149 - Sezione CC

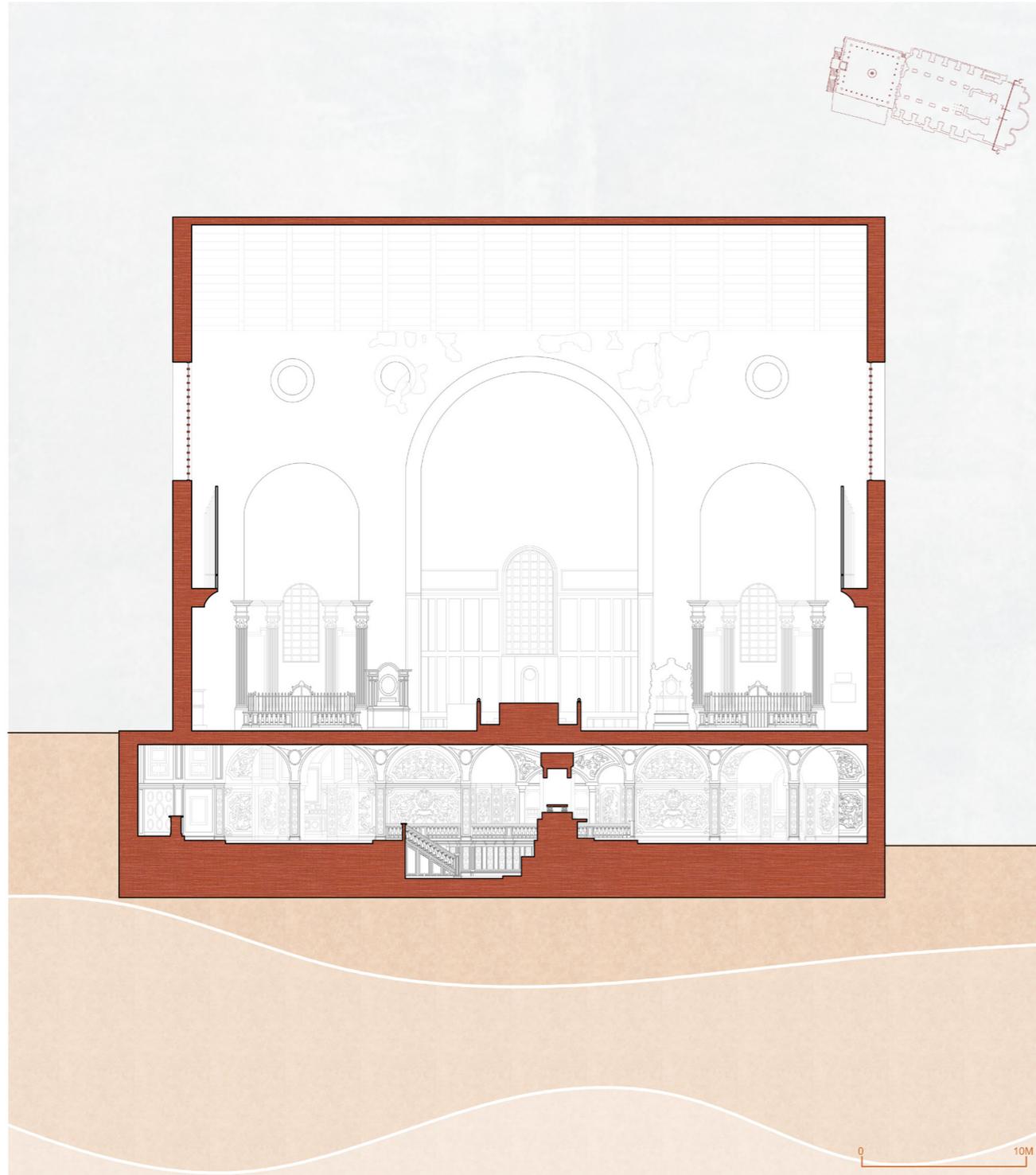
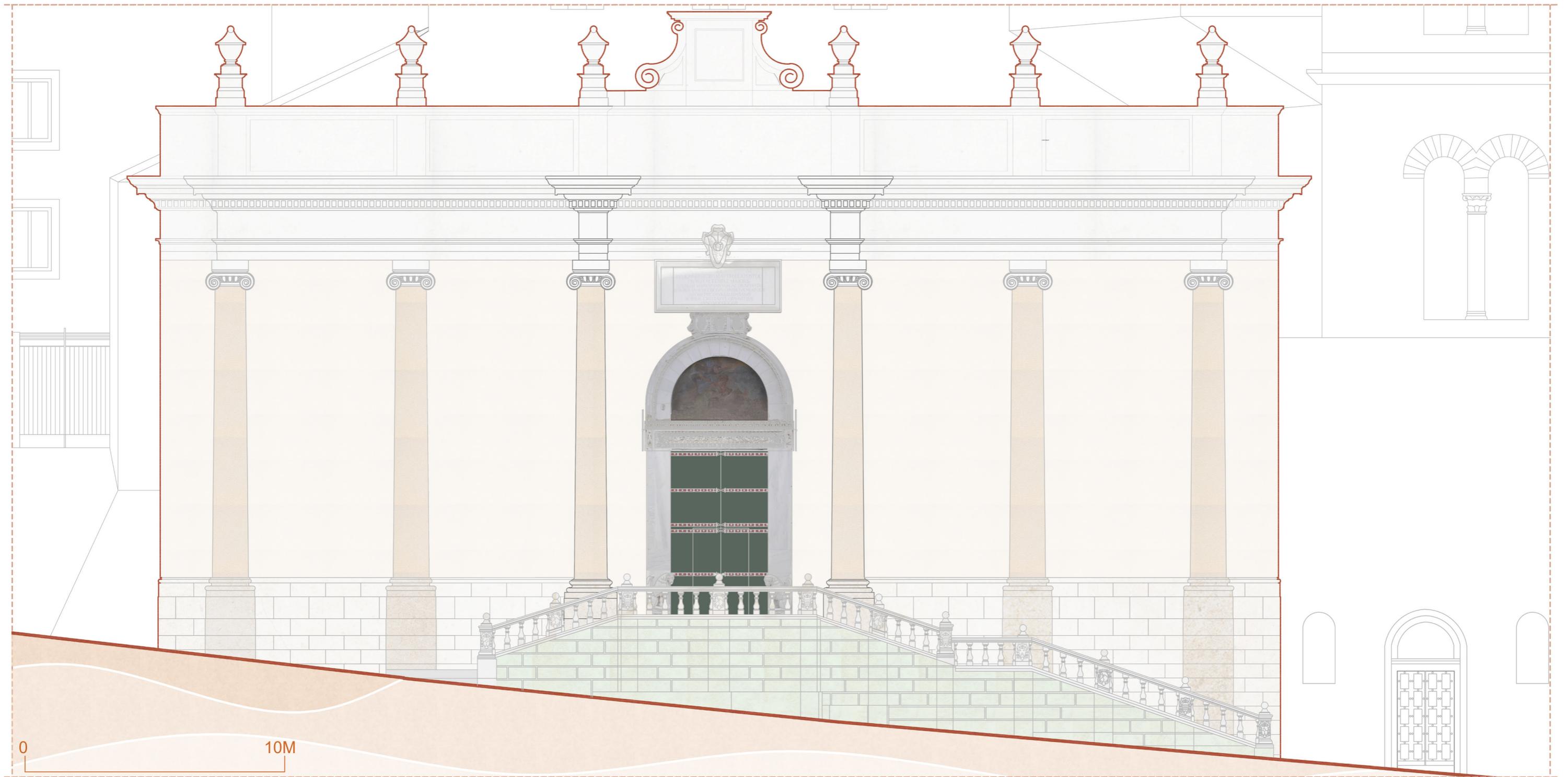


Fig. 151 - Prospetto della Facciata d'ingresso



### 7.1 Sperimentazione del modello dinamico

Dal punto di vista operativo, la costruzione del modello previsionale teorizzato è consistito nell'utilizzo di algoritmi di apprendimento automatico che descrivono lo stato di avanzamento delle forme di degrado a partire da dati numerici estrapolati dai dati puntiformi. La scelta tra le diverse tecniche di apprendimento è ricaduta sull'analisi di regressione che si presenta in molte forme, tra cui lineare, non lineare, logistica e multilineare. Nel caso specifico, tra le diverse tecniche viene analizzata quella di regressione lineare, che utilizza una linea retta per descrivere un set di dati e determinare la forza di una relazione tra variabili (Lewis-Beck C. and Lewis-Beck, 2015). Difatti, la regressione lineare comprende una linea retta che divide i punti dati su un grafico a dispersione. L'obiettivo è dividere i dati in modo da ridurre al minimo la distanza tra la linea di regressione e tutti i punti dati sul grafico a dispersione (Dudek, 2016). Oltre ad essere considerata una delle tecniche più importanti ed ampiamente utilizzate in letteratura, uno dei suoi vantaggi principali è la facilità di interpretazione dei risultati. La regressione lineare adatta un modello lineare con coefficienti  $w = (w_1, \dots, w_p)$  per minimizzare la somma residua dei quadrati tra gli obiettivi osservati nel set di dati e gli obiettivi previsti dall'approssimazione lineare (Yan and Xiao, 2003).

Per verificare l'applicabilità ed efficacia del modello teorizzato, il progetto di monitoraggio, testato sul Quadriportico della Cattedrale di San Matteo,

è stata suddiviso in più fasi di lavoro che, a partire dall'organizzazione del dato, hanno portato all'esplicitazione del modello prefigurato. Le superfici esterne del Quadriportico, interessate dalla campagna di rilievi delle aree degradate, comprendono rispettivamente le pareti Nord e Sud.

In particolare, le fasi operative hanno seguito il seguente workflow finalizzato alla previsione del degrado:

- i) Rilevamento delle aree degradate con acquisizioni *reality-based*;
- ii) Elaborazione e restituzione del dato sottoforma di modello puntiforme;
- iii) Analisi quantitativa e qualitativa del dato puntiforme;
- iv) Addestramento del modello di previsione con approccio di apprendimento statistico, vale a dire una delle forme di classificazioni proprie dell'Intelligenza artificiale;

Mantenendo il focus sulle parti ammalorate, interessate dal distacco di intonaco, sono state selezionate tutte le scansioni, acquisite con le diverse metodologie di rilievo e nei differenti periodi che hanno coperto un range temporale che è andato dal 14 febbraio 2021 al 10 maggio 2022. Su ogni singola scansione sono state sviluppate un'analisi di tipo qualitativo, con lo studio del valore di riflettanza, ed un'analisi di tipo metrico mediante una manipolazione diretta del dato puntiforme. Per ogni singola scansione, agendo sull'intervallo di scala in modalità di visualizzazione in falsi colori, l'immagine ha permesso di fare delle prime considerazioni sulla natura dei materiali: spiccano in blu le aree caratterizzate da un forte assorbimento del raggio laser cui corrisponde una minore riflettanza mentre le aree in verde/giallo evidenziano parti di superfici a maggiore riflettanza. La diversa cromia rilevata evidenzia le aree interessate da distacco di intonaco.

Successivamente le singole scansioni sono state approfondite da una analisi metrica. La misurazione delle singole aree è avvenuta in ambiente digitale avvalendosi dei tool di misurazione presenti all'interno dell'applicativo ReCap PRO<sup>1</sup>, applicativo della *Autodesk*.

I valori delle misure insieme ai *time-stamp* di acquisizione sono alla base del modello previsionale divenendo rispettivamente variabile dipendente e variabile indipendente. La variabile dipendente (o variabile *y*) è la variabile risposta ovvero il fattore principale che si sta tentando di comprendere e prevedere: avanzamento della forma di degrado. Le variabili indipendenti

sono le variabili esplicative ovvero i fattori che potrebbero influenzare la variabile dipendente: tempo. Attraverso l'analisi di regressione possiamo valutare la correlazione tra una variazione della variabile indipendente (*x*) e una della variabile dipendente (*y*). In generale, più i punti dati sono vicini alla linea di regressione, più precisa sarà la previsione finale. Mentre, se vi è un alto grado di deviazione tra i punti dati e la linea di regressione, la retta fornirà previsioni meno accurate. Inoltre, per validare la performance di previsione, bisogna determinare il coefficiente di determinazione (anche conosciuto come *R-squared score* o  $R^2$ ), il cui valore è compreso tra 0 e 1 e può essere letto in questo modo:

$R^2 < 0.3$  il modello è errato.

$0.3 < R^2 < 0.5$  il modello è scarso.

$0.5 < R^2 < 0.7$  il modello è discreto.

$0.7 < R^2 < 0.9$  il modello è buono.

$0.9 < R^2 < 1$  il modello è ottimo.

Il processo è stato effettuato in Microsoft Excel attraverso il ToolPack - Excel Data Analysis<sup>2</sup>.

Note le variabili, è stata calcolata la stima attraverso una serie di procedimenti qui riportati:

- Seleziona "Dati" dalla barra degli strumenti.
- Seleziona "Analisi dei dati" > "Strumenti".
- Dal menu, seleziona "Regressione" e fai clic su "OK".

Nella finestra di dialogo Regressione, fare clic sulla casella "Input Y Range" e selezionare i dati della variabile dipendente.

Fare clic sulla casella "Input X Range" e selezionare i dati della variabile indipendente.

Fare clic su "OK" per eseguire i risultati. Attraverso la funzione 'Regressione', il software calcola il tipo di relazione lineare.

Come mostrato nella figura 152, il coefficiente  $R^2$  evidenzia il forte legame tra le dimensioni metriche e temporali. Sebbene in questa fase i dati a

DATA	FOTOGRAMMETRIA	LIDAR	LASER SCANNER
14/02/2021	1,59		
15/02/2021			
23/02/2021	1,61		
07/07/2021			1,61
23/10/2021			1,61
23/10/2021			1,61
10/01/2022	1,63	1,63	
10/02/2022	1,63	1,63	
10/03/2022	1,63	1,63	
10/04/2022	1,63	1,63	
10/05/2022	1,63	1,63	

Fig. 152 - Dataset di partenza per l'analisi statistica del modello previsionale.

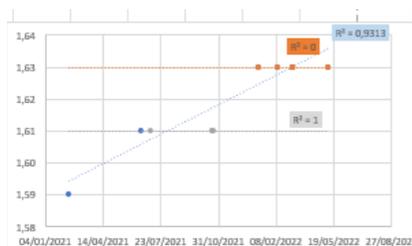


Fig. 153 - Modello di regressione lineare.

disposizione sono di un numero ridotto, la linea di tendenza offre già un punto di riferimento base per la previsione dei valori. Sulla base della pendenza della retta il coefficiente  $R^2$  dei dati fotogrammetrici è leggermente superiore a quello dei dati acquisiti da Lidar. I due valori sono comunque estremamente vicini tali da non permettere di ipotizzare significative differenze tra i due strumenti di rilevamento presi in esame. La deviazione, invece, è riferita alla distanza dal punto alla retta.

Attraverso l'approccio così costituito, la procedura è stata successivamente ripetuta per le altre parti ammalorate. Di volta in volta, i risultati dell'applicazione della metodologia proposta sono stati valutati considerando, caso per caso, l'andamento della retta e i valori dei coefficienti  $R^2$ . A lato è riportato come esempio il modello di regressione lineari ottenuto per l'area ammalorata (Figg. 153). Sulla base dei valori  $R^2$  ottenuti, la fase di addestramento ha consentito di ottenere un modello idoneo all'analisi di monitoraggio.

## 7.2 Verifica dei modelli previsionali

Per validare i risultati previsionali ottenuti dalla costruzione del modello di regressione è stato applicato un protocollo sperimentale su *cross validation*.

In particolare, sono stati investigati diversi scenari:

- nel primo scenario si eludono dal dataset gli ultimi tre punti delle misurazioni effettuate.
- nel secondo scenario si eludono dal dataset gli ultimi due punti;
- nel terzo scenario si elude, invece, l'ultimo dato di input. È importante specificare che di questi dati conosciamo già i valori reali ma vengono nascosti all'addestramento del modello.



Fig. 154 - Previsione dei dati futuri.

A partire dai differenti scenari, attraverso la funzione “regressione lineare”, si ottiene l'equazione della retta.

Sostituendo nell'equazione della retta all'incognita  $x$  il valore della misurazione nascosta si ottiene il valore  $y$  che predice così una misurazione. Quest'ultima viene confrontata con il valore di cui si conosce il dato reale ottenendo così una stima dell'errore di predizione del modello.

Il test è stato condotto per tutte le parti ammalorate verificando la predizione dei dati e confrontandoli con i valori reali. Di seguito si riportano tutte le analisi eseguite (Fig. 154).

Come è possibile evincere dai grafici, sebbene i valori a disposizione siano davvero pochi, i risultati sono ottimali e già, in questa fase, potrebbero essere d'aiuto per intervenire su quelle parti affette da fenomeni di degrado. Tuttavia, lo scopo della ricerca non è mirato al risultato ma alla metodologia da seguire per la costruzione di un modello previsionale.

## Note

- 1- <https://www.autodesk.com/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- 2- <https://support.microsoft.com/en-us/office/use-the-analysis-toolpak-to-perform-complex-data-analysis-6c67ccf0-f4a9-487c-8dec-bdb5a2cefab6>.
- 3- La *cross validation* (o validazione incrociata) è una tecnica statistica usata nel machine learning.

Le analisi condotte in questo lavoro di tesi sono state elaborate con l'intenzione di sviluppare una metodologia d'indagine. Il rilievo è servito come punto di partenza per sviluppare un modello previsionale mediante applicazioni di AI seppur con pochi dati a disposizione. Sebbene in questa fase è stato possibile ottenere dei primi risultati, l'implementazione di un Sistema sensoristo avanzato (IoT, telecamere, flussi di dati provenienti da smartphone, Digital door, dati satellitari, open data) potrà consentire in futuro di avere un bacino di informazioni molto più ricco e affidabile da far confluire in un unico gemello digitale a supporto della progettazione e del decision making.

Pertanto, a partire dai sensori low-cost, per verificare e testare ulteriormente le capacità del sensore LiDAR da utilizzare poi per generare algoritmi predittivi di apprendimento automatico, sono stati condotti alcuni test all'interno del dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

Tale sperimentazione si inserisce all'interno di un nuovo filone di ricerca innovativo che, nato dalla sinergia e dalla collaborazione di architetti e ricercatori in meccanica applicata dell'ateneo federiciano, mira ad analizzare sistemi di acquisizione tridimensionali *low-cost* e algoritmi di "Detection" con l'obiettivo di generare sistemi previsionali di apprendimento automatico per l'indagine diagnostica preliminare al progetto di restauro. Da qui, la ricerca illustra gli esiti di una sperimentazione tuttora *in fiero* volta a definire

Fig. 155- Approccio metodologico della ricerca.



un workflow metodologico che alle componenti morfo-metriche, acquisite con rilievo speditivo e *low-cost* su veicolo motorizzato, associa applicazioni di Intelligenza Artificiale con lo scopo di tradurre i dati grezzi in analisi previsionali utili al monitoraggio di fenomeni di degrado che il patrimonio costruito, con enfasi sui Beni Culturali, subisce nel corso del tempo.

In ragione di tali specificità, sono stati analizzati i sistemi di acquisizione LiDAR integrati su dispositivi commerciali e low cost, quali iPhone 12Pro e iPhone12Pro Max per valutare le potenzialità e criticità di questi sensori miniaturizzati installati a loro volta su veicolo radiocomandato. Il test è stato condotto con sensori miniaturizzati, di dimensioni sub-centimetriche, tra cui LiDAR (Light Detection And Ranging) e fotocamere integrate nei prodotti Apple tra cui smartphone e tablet di ultima generazione. Pertanto, partendo da queste considerazioni, sono stati effettuati una serie di sperimentazioni per valutare le potenzialità di questi innovativi sensori per acquisizioni di tipo dinamiche. Più in dettaglio, sono state analizzate le prestazioni dei sensori integrati su iPhone12Pro e iPhone12ProMax che a loro volta sono stati montati, con supporti stampati in 3D, su un veicolo radiocomandato.

Per questa sessione di test preliminare, sono stati scelti come edifici di riferimento dei plastici di architettura, per riprodurre in scala ridotta la complessità di un edificio reale. Per simulare i fenomeni di degrado sono stati applicati sui modelli una serie di adesivi colorati; in questo modo

Fig. 156- Strumenti utilizzati

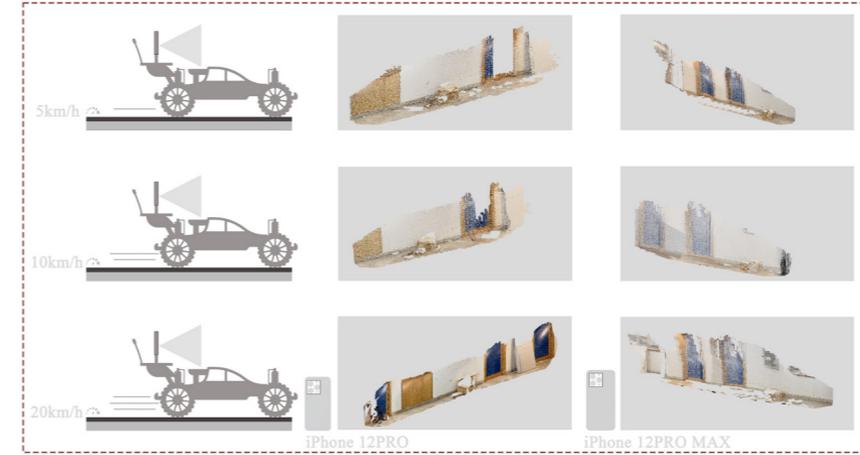
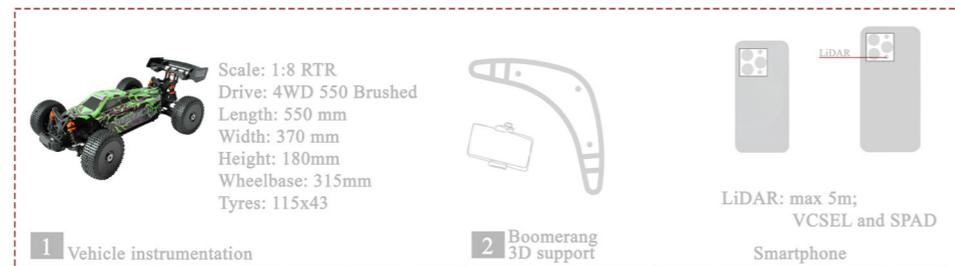


Fig. 157 - Scenario di acquisizione con veicolo.

sono state acquisite diverse acquisizioni con sensori fotografici che LiDAR modificando l'aspetto dei modelli secondo tre protocolli di acquisizione:

- 1) acquisizione "no defect";
- 2) acquisizione "with defect";
- 3) acquisizione "mixed configuration";

Al contempo, sono state effettuate una serie di operazioni di pre-processing per verificare l'accuratezza dei dati acquisiti e per estrapolare diverse informazioni sulle condizioni del veicolo, come velocità, accelerazione, posizione GPS. Tutti questi dati rappresentano un ruolo chiave per l'estensione di questa metodologia su un'applicazione reale, perché per ottenere corrette acquisizioni dinamiche è fondamentale riconoscere le reali condizioni operative del veicolo utilizzato per le attività di diagnosi.

Successivamente, dal punto di vista operativo, le attività sono state organizzate in diverse fasi:

- (i) Analisi degli strumenti adottati;
- (ii) acquisizione di nuvole di punti 3D, fotogrammi di telecamere e dati del veicolo;
- (iii) pre-trattamento dei dati;
- (iv) Analisi di diversi tipi di reti neurali;
- (v) preparazione della banca dati della formazione;

- (vi) Formazione e validazione della rete neurale convoluzionale;
- (vii) Ulteriore convalida della procedura di rilevamento globale su altri dati acquisiti (Fig. 155).

Nella prima fase del workflow operativo è stato opportuno valutare, innanzitutto, le caratteristiche dei due sensori impiegati e del veicolo radiocomando (si rimanda al cap. VI) (Fiorini, 2022; Teppati et al., 2022). A differenza degli altri studi analizzati in letteratura, per questo test si è deciso di acquisire dati con tre livelli di risoluzione (*high, medium, low res*) e su un veicolo motorizzato con tre diversi livelli di velocità (*high, medium, low speed*). Inoltre, prima di procedere con la corretta fase di acquisizione è stato necessario realizzare un supporto stampato in 3D, a forma di boomerang, che permettesse di installare in sicurezza i due smartphone sul veicolo, evitando la possibilità che i due, vibrando, potessero toccarsi durante le fasi di acquisizione. Infine, per acquisire la velocità del veicolo, è stato installato un terzo smartphone con sistema operativo Android e un'applicazione dedicata. Il veicolo radiocomandato di riferimento è un 4WD Destructor BBR Buggy spazzolato RTR, in scala 1:8 con le principali caratteristiche mostrate in Fig. 156.

In seguito alla valutazione delle caratteristiche tecnologiche delle strumentazioni prese in esame, lo step successivo del workflow operativo ha riguardato la fase di acquisizione dei dati; questa parte è ulteriormente suddivisa in due sottofasi. Infatti, la raccolta dati nello scenario creato utilizzando modelli architeturali in scala 1:100 è stata organizzata in due diverse macro-acquisizioni. Nella prima sono stati acquisiti “*dati clean*” mentre nella seconda sottofase è stata caratterizzata l’acquisizione di “*dati dirty*”, poiché su tutti i modelli sono stati applicati diversi adesivi colorati per simulare fenomeni di degrado. In entrambe le fasi, le informazioni morfo-metriche e colorimetriche sono state acquisite contemporaneamente sui due dispositivi, utilizzando l’applicazione “*3D Scanner*” che ha permesso l’acquisizione e la visualizzazione in tempo reale delle nuvole di punti e anche la personalizzazione delle impostazioni relative alla modalità di registrazione e alla qualità della nuvola stessa. In totale sono state acquisite 26 scansioni (13 su iPhone 12 Pro e 13 su iPhone 12 ProMax) della durata di 30 secondi ciascuna; Queste scansioni variano per la velocità del veicolo durante l’acquisizione (bassa, media e alta) e anche per la qualità della nuvola di punti (bassa o alta). Inoltre, per tutte le scansioni registrate, le fasi di post-elaborazione dei dati sono state eseguite all’interno dell’applicazione stessa. È necessario precisare che questo processo ha occupato uno spazio

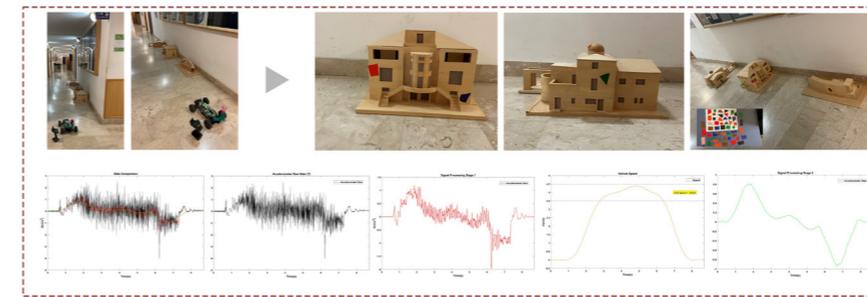


Fig. 158 - Scenario di acquisizione, veicolo dinamico e dataset con segnali di danno.

di archiviazione di 5 Gb, riducendo notevolmente la percentuale di carica della batteria a causa dell’elevato costo computazionale, con un tempo di elaborazione di circa 3 minuti per ogni scansione, di cui 1 minuto dedicato alla fase di colorazione. Successivamente, tutti i dati sono stati esportati in formato .ply all’interno dell’applicazione *Cloud Compare*. Prima di tutto, è stata effettuata un’analisi della densità delle nuvole di punti acquisite, dai diversi dispositivi, confrontando i risultati per le diverse velocità del veicolo e la qualità impostata.

I risultati, per entrambi i dispositivi, sono davvero significativi: l’analisi della densità delle nuvole di punti ha mostrato una quantità molto maggiore di punti acquisiti per le acquisizioni ottenute con alta velocità e alta qualità. Per quanto riguarda i dati di colorazione, è possibile notare come la qualità dei sensori integrati dell’iPhone 12Pro Max sia significativamente superiore rispetto agli altri smartphone (Figg. 157-158). Sebbene le diverse applicazioni suggeriscano, durante le fasi di registrazione, di mantenere una distanza dall’oggetto da rilevare tra 1 e 4,5 metri e che la stessa velocità del veicolo potrebbe influenzare negativamente la qualità dei risultati, dopo il test effettuato è possibile affermare che il sensore ha una portata effettiva che non supera i 4,30 metri ma è in grado di acquisire dati fino a 40 km/h.

Successivamente, tutti i frame e le nuvole di punti acquisiti sono stati estratti per costruire il database di immagini per le reti neurali convoluzionali (CNN) (O’Shea et al, 2015, Albawi et al., 2017, Rawat et al., 2017, Aloysius et al., 2017). Tra le diverse reti neurali sono state analizzate le Convolutional Neural Network (CNN) comunemente utilizzata per diversi scopi legati al rilevamento di oggetti a partire da immagini e/o set di dati di nuvole di punti (Zhang et al., 2016, Kagaya et al., 2014, Yamashita et al., 2018). Le CNN sono una tipologia specifica di Reti Neurali, ampiamente adottate per molti scopi diversi in cui è necessario applicare metodologie

di apprendimento automatico ai set di dati delle immagini; in particolare, sono utilizzate per il rilevamento di problemi relativi agli sviluppi dei veicoli automatizzati (Chen et al., 2022, Guo et al., 2022, Benjumea et al., 2021).

Il vantaggio principale di questa tecnica è che, dopo una corretta pre-elaborazione del database immagini, compresa una fase di aumento ed etichettatura, la rete è in grado di rilevare automaticamente le caratteristiche rilevanti su cui calibrare la procedura di rilevamento.

La differenza principale con le classiche Reti Neurali Artificiali è che non è necessario estrarre la caratteristica rilevante del dataset prima dell'addestramento, ma questa procedura è completamente integrata nella CNN stessa. Questo costituisce un vantaggio fondamentale nell'elaborazione delle immagini, perché generalmente è abbastanza complesso definire le diverse classi di classificazione tenendo conto di tutte le possibili combinazioni di pixel che identificano uno specifico oggetto (o difetto, come nel caso proposto).

La novità dell'approccio proposto è legata all'applicazione di questo tipo di algoritmo di *machine learning* ad un campo di applicazione non comune. Infatti, sono pochi i lavori in letteratura che mostrano l'applicazione della CNN in contesti architettonici. Al fine di migliorare la qualità delle immagini acquisite, vengono eseguite una serie di procedure di potenziamento con l'obiettivo di massimizzare le prestazioni della rete; Inoltre, viene eseguita una procedura di etichettatura per selezionare correttamente il difetto introdotto nei diversi fotogrammi. Quindi, vengono eseguiti diversi tentativi di addestramento per le reti neurali convoluzionali, modificando diversi parametri al fine di trovare il miglior compromesso per massimizzare le prestazioni della rete e la percentuale di difetti correttamente rilevati.

Durante la fase di addestramento, una porzione del *datatore* di immagini è già utilizzata per eseguire una validazione delle prestazioni CNN, ma al fine di verificare completamente la bontà della procedura viene eseguita un'ulteriore validazione su un piccolo dataset di dati invisibili (non inclusi nel dataset di addestramento), in cui sono presenti sia con difetti che senza frame di difetti. I risultati confermano l'affidabilità dell'approccio proposto, dando risultati incoraggianti per quanto riguarda la rilevazione dei difetti architettonici.

## Osservazioni

I test preliminari condotti sui modelli architettonici utilizzando un veicolo radiocomandato dotato di sensori a basso costo offre la possibilità di sviluppare una metodologia di indagine con la possibilità di estrarre informazioni utili per l'indagine diagnostica, propedeutica al progetto di restauro, utilizzando algoritmi di intelligenza artificiale.

I sensori integrati negli smartphone utilizzati hanno un ruolo fondamentale nella definizione della posizione GPS e della condizione in cui vengono raccolti i diversi frame e nuvole di punti. Combinando queste informazioni con l'output ottenibile dall'utilizzo di una Rete Neurale Convoluzionale, opportunamente addestrata sui dati acquisiti, si ottengono risultati sostanziali per lo sviluppo di nuove procedure di diagnosi applicate ai Beni Culturali.

Al momento, la strumentazione mostra ancora alcuni limiti relativi alla distanza massima degli oggetti rilevabili, ma la qualità dei risultati ottenuti è incoraggiante per estendere la metodologia proposta a contesti di scala più ampia se gli investimenti in questo tipo di tecnologia continueranno allo stesso ritmo degli ultimi anni. Inoltre, la possibilità di ottenere informazioni rilevanti sulle condizioni del veicolo durante le acquisizioni potrebbe rappresentare, al contempo, un fattore chiave per l'applicazione di questo tipo di procedura in uno scenario reale. Sebbene la procedura venga applicata su piccola scala, i risultati ottenuti sono molto incoraggianti per l'esplorazione di un'applicazione su scala reale. Per questo motivo, l'approccio proposto costituisce un valido superamento delle classiche procedure adottate per il monitoraggio e la mappatura delle componenti morfo-metriche, fornendo un valido supporto per l'operazione di manutenzione predittiva per la conservazione dei Beni Culturali e fornendo risultati oggettivi all'esperto di dominio<sup>1</sup>.

## Note

1- Nello specifico, il lavoro di ricerca *in progress* qui presentato è frutto della collaborazione con la *start-up* Megaride, spin-off dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II". Si ringraziano, congiuntamente, per lo studio condotto, i ricercatori Flavio Farroni e Andrea Genovese e il dottorando Guido Napolitano Dell'Annunziata del Dipartimento di Ingegneria Industriale.

Indice delle figure

Fig. 1: “Evoluzione del concetto di *Big Data*”. Fonte: rielaborato da G. Santoro, “Data Space – Il rilievo urbano come strumento per una progettazione data driven”. Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Relatore prof. arch. Massimiliano Campi, Correlatore arch. Marika Falcone, 2021.

Fig. 2: “Sperimentazioni di monitoraggio per il progetto di riqualificazione di Trafalgar Square a Londra”. Fonte: rielaborato da G. Santoro, “Data Space – Il rilievo urbano come strumento per una progettazione data driven”. Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Relatore prof. arch. Massimiliano Campi, Correlatore arch. Marika Falcone, 2021.

Fig. 3: “Sperimentazione dell’indice di disiderabilità delle strade di Boston, USA”. Fonte: rielaborato da G. Santoro, “Data Space – Il rilievo urbano come strumento per una progettazione data driven”. Tesi di Laurea Magistrale in Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Relatore prof. arch. Massimiliano Campi, Correlatore arch. Marika Falcone, 2021.

Fig. 4: “Il monitoraggio dell’Harvard Bridge con azioni di Crowdsensing. Acquisizione dati proveniente dagli smartphone degli automobilisti in transito”. Fonte: Matarazzo T., Santi P. & Pakzad S. Carter K. Ratti C., Moaveni B. Osgood C. and Jacob N. “Crowdsensing Framework for Monitoring Bridge Vibrations Using Moving Smartphones” in Proceedings of the IEEE. 106. 10.1109/jproc.20182808759, 2018.

Fig. 5: Esempificazione del concetto di Intelligenza Artificiale applicata nel campo medico. Fonte: <https://www.businessintelligencegroup.it/intelligenza-artificiale-e-medicina/>.

Fig. 6: “Banca dati del *Pan American Health Organization*”. Fonte: <https://bvsalud.org/es/>.

Fig. 7: “Esemplificazione grafica del concetto di Digital Twin”. Fonte <https://www.prodata.it/digital-twin-come-funziona/>.

Fig. 8: “Applicazione dei modelli previsionali nei diversi campi d’indagine analizzati”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 9: “Organizzazione gerarchica del comitato ICOMOS, CIPA HD”. Fonte: Sito UNESCO e ICOMOS.

Fig. 10: “Modello digitale della cattedrale di San Matteo a Salerno”. Fonte: Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 11: “Annotazione semantica del concetto “capitello” associata sul modello digitale di una colonna della chiesa monastica di San Lorenzo a Padula (SA)”. Fonte: Cera V. “Il rilievo dell’Architettura tra identificazione tipologica e strutturazione semantica. La Certosa di San Lorenzo a Padula nella rappresentazione digitale per il Cultural Heritage”. Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Architettura. – XXXI ciclo, 2019.

Fig. 12: “Segmentazione gerarchica in livelli del modello tridimensionale della Fontana di Nettuno e successiva suddivisione in sotto-componenti su ciascun livello”. Fonte: Apollonio F. I., Basilissi V., Callieri M., Dellepiane, M. Gaiani, M., Ponchio F., Rizzo F., Rubino A. F., Scopigno R. and Sobrà G., “A 3D-centered information system for the documentation of a complex restoration intervention”, *Journal of Cultural Heritage*, 29, 2018.

Fig. 13: “Annotazione semantica sul modello tridimensionale”. Fonte: Roussel R., Bagneris Marine L., Livio and Bomblet P. “A digital diagnosis for the «autumn» statue (marseille, france) : photogrammetry, digital cartography and construction of a thesaurus” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W15. 1039-1046. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1039-2019.

Fig. 14: “Ricostruzione H-BIM basata sul rilievo tridimensionale. Fase di elaborazione del modello H-BIM dell’Atrio dei Marmi all’interno dell’Archivio di Stato di Napoli”. Fonte: Scandurra S. “Processi di traduzione dei dati di rilievo strumentale per la realizzazione di modelli informativi del Patrimonio Architettonico esistente”. Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Architettura. – XXXII ciclo. 2020.

Fig. 15: “Fig. 15 – Schematizzazione del Digital Twin secondo Simon Evans”. Evans S. “Beyond buzzwords: the true meaning and value of digital twin” in <https://www.snclavalin.com/en/beyond-engineering/beyond-buzzwords-the-true-meaning-and-value-of-digital-twins>, 2019.

Fig. 16: “Workflow operativo HS-BIM”. Fonte: Santagati C. and La Russa F. “Historical sentient – building information model: a digital twin for the management of museum collections in historical architectures”. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLIII-B4-2020. 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-755-2020, 2020.

Fig. 17: “Schematizzazione della struttura di un modello a grafo LPG”. Fonte: <https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-property-graph-difference/>.

Fonte: 18: “Schematizzazione della struttura di un modello a grafo RDF”. Fonte:

<https://neo4j.com/blog/rdf-triple-store-vs-labeled-property-graph-difference/>.

Fig. 19: “Esempio di rappresentazione grafica dell’attività social estratta da Flickr rispetto all’oggetto *Wikidata* che rappresenta l’Arco della Pace”. Fonte: Falcone M., Origlia A., Campi M. and De Martino S. “From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data for management for cultural heritage conservation with digital twins” in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLIII-B4-2021 - XXIV ISPRS Congress (2021 edition), pp. 47-53, 2021.

Fig. 20: “Schema di comunicazione tra gli attori coinvolti nel passaggio dei dati: (S)sensori, (P)processori e (A)analizzatori con Neo4j e un database specializzato di Time Series”. Fonte: Falcone M., Origlia A., Campi M. and De Martino S. “From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data for management for cultural heritage conservation with digital twins” in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLIII-B4-2021 - XXIV ISPRS Congress (2021 edition), pp. 47-53, 2021.

Fig. 21: “Architettura basata su Kafka per la gestione del passaggio/streaming dei messaggi”. Fonte: Falcone M., Origlia A., Campi M. and De Martino S. “From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data for management for cultural heritage conservation with digital twins” in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLIII-B4-2021 - XXIV ISPRS Congress (2021 edition), pp. 47-53, 2021.

Fig. 22: “Rappresentazione, in Neo4j, degli attori coinvolti e delle loro relazioni”. Fonte: Falcone M., Origlia A., Campi M. and De Martino S. “From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data for management for cultural heritage conservation with digital twins” in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLIII-B4-2021 - XXIV ISPRS Congress (2021 edition), pp. 47-53, 2021.

Fig. 23: “Tecniche della Geomatica per l’acquisizione tridimensionale di dati, rappresentate in base alla dimensione della scena/oggetto ed alla complessità del modello digitale ricostruito”. Fonte: rielaborato da Remondino F. and Campana S. “3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practice” in *BAR International Series* 2598, 2014.

Fig. 24: “Schema di funzionamento di uno scanner tridimensionale a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser”. Fonte: Russo M., Remondino F. and Guidi G. “Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico” in *Archeologia e Calcolatori*, n. 22, Edizioni All’insegna del Giglio s.a.s., pp.169-198, ISSN: 1120-6861, ISBN: 978-88-7814-526-9, 2011.

Fig. 25: “Sistema di misurazione tridimensionale tramite proiezione di pattern (cerchi)”. Fonte: Guidi G., Russo M. and Beraldin J.A. “Acquisizione 3D e mo-

dellazione poligonale”, McGraw-Hill, 2010.

Fig. 26: “Sistema di misurazione tridimensionale tramite proiezione di pattern (griglia rettangolare)”. Fonte: Guidi G., Russo M. and Beraldin J.A. “Acquisizione 3D e modellazione poligonale”, McGraw-Hill, 2010.

Fig. 27: “Schema di funzionamento di uno scanner a tempo di volo (TOF)”. Fonte: Russo M., Remondino F. and Guidi G. “Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico” in *Archeologia e Calcolatori*, n. 22, Edizioni All’insegna del Giglio s.a.s., pp.169-198, ISSN: 1120-6861, ISBN: 978-88-7814-526-9, 2011.

Fig. 28: “Schema di funzionamento di una strumentazione a Modulazione di Fase per l’acquisizione dei dati”. Fonte: Bawden G., Howle J., Bond S., Shriro M and Buck P., “Three-Dimensional Imaging, Change Detection, and Stability Assessment during the Centerline Trench Levee Seepage Experiment Using Terrestrial Light Detection and Ranging Technology, Twitchell Island, California, 2012”, U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1092, 28 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20141092>.

Fig. 29: “Esempio di target sferico”. Fonte: <http://www.3dscan.it/blog/1-importanza-dei-target-in-una-scansione-laser-scanner/>.

Fig. 30: “Esempio di target piano”. Fonte: <https://shop.laserscanning-europe.com/Set-di-5-target-magnetici-di-riferimento-a-scacchiera>.

Fig. 31: “Scanner con acquisizione statica”. Fonte: <https://geoprema.com/products/used-equipment/rentals/faro-3d-s120-laser-scanner/>.

Fig. 32: “Esempio di strumentazione MMS con carrello: TIMMS - Trimble Indoor Mobile Mapping Solutions, Trimble”. Fonte: <https://www.trimble-italia.com/prodotti/mobile-mapping/trimble-timms>.

Fig.33: “Esempio di strumentazione MMS con zaino: Pegasus Backpack, Leica”. Fonte: <https://www.archeomatica.it/documentazione/zaino-in-spalla-per-rilievo-mobile-mapping-della-fortezza-da-basso-firenze>.

Fig. 34: “Esempio di strumentazione MMS con supporto a braccio: X120<sup>GO</sup> Stonex”. Fonte: <https://www.stonex.it/it/project/x120go-slam-laser-scanner/>.

Fig. 35: “Esempio di strumentazione MMS con esoscheletro indossabile: Nav-Vis VLX, NavVis”. Fonte: <https://www.navvis.com/>.

Fig. 36: “Joseph Nicéphore Niépce, la prima fotografia della storia”. Fonte: <https://ilfotografo.it/news/lavventura-del-bianco-e-nero-joseph-nicephore-niepce-e-la-prima-fotografia/>.

Fig. 37: “Principio di collinearità: relazione tra il centro di proiezione prospettica della fotocamera, un punto dell’immagine e il suo corrispondente nello spazio”. Fonte: Remondino F. e Campana S. “3D Recording and Modelling in Archaeolo-

gy and Cultural Heritage: Theory and Best Practice” in *BAR International Series* 2598, 2014.

Fig. 38: “Relazione tra la distanza focale, il formato del sensore e l’angolo di campo”. Fonte: De Luca L., “La fotomodellazione architettonica”, Dario Flaccovio Editore, 2011.

Fig. 39: “Ripresa fotografica ad assi paralleli”. Fonte: De Luca L., “La fotomodellazione architettonica”, Dario Flaccovio Editore, 2011.

Fig. 40: “Ripresa fotografica ad assi convergenti”. Fonte: De Luca L., “La fotomodellazione architettonica”, Dario Flaccovio Editore, 2011.

Fig. 41: “Metodo di *bundle adjustment*”. Fonte: Remondino F. e Campana S. “3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage: Theory and Best Practice” in *BAR International Series* 2598, 2014.

Fig. 42: “Rappresentazione visiva degli ambiti della *Computer Science*”. Fonte: [https://www.nrigroupindia.com/e-book/Introduction%20to%20Machine%20Learning%20with%20Python%20\(%20PDFDrive.com%20\)-min.pdf](https://www.nrigroupindia.com/e-book/Introduction%20to%20Machine%20Learning%20with%20Python%20(%20PDFDrive.com%20)-min.pdf).

Fig. 43: “I diversi step del processo KDD”. Fonte: Caputo A. “Smart Cities: una metodologia data-driven per la predizione del Bus Passenger Load”. Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi di Napoli Federico II, 2020.

Fig. 44: “Decomposizione della *time series*”. Fonte: Di Torrepadule R. “Un sistema basato su AI per la gestione della rete di mobilità in una Smart City” Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi di Napoli Federico II, 2020.

Fig. 45: “*Time series forecasting*”. Fonte: Di Torrepadule R. “Un sistema basato su AI per la gestione della rete di mobilità in una Smart City” Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi di Napoli Federico II, 2020.

Fig. 46: “Modello di regressione lineare”. Fonte: [https://www.nrigroupindia.com/e-book/Introduction%20to%20Machine%20Learning%20with%20Python%20\(%20PDFDrive.com%20\)-min.pdf](https://www.nrigroupindia.com/e-book/Introduction%20to%20Machine%20Learning%20with%20Python%20(%20PDFDrive.com%20)-min.pdf).

Fig. 47: “Interpretazione dei valori R<sup>2</sup>”. Fonte: [https://www.quadernodiepidemiologia.it/epi/cause/coef\\_cor.htm](https://www.quadernodiepidemiologia.it/epi/cause/coef_cor.htm).

Fig. 48: “Struttura di un albero decisionale: nodi, foglie, archi.”. Fonte: Di Torrepadule R. “Un sistema basato su AI per la gestione della rete di mobilità in una Smart City” Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi

di Napoli Federico II, 2020.

Fig. 49: “Esempio di Albero decisionale”. Fonte: Patel H. and Prajapati P. “Study and Analysis of Decision Tree Based Classification Algorithms” in International Journal of Computer Sciences and Engineering, 6. 74-78. 10.26438/ijcse/v6i10.7478, 2018.

Fig. 50: “Architettura di una rete neurale CNN”. Fonte: <https://medium.com/sfucspmp/an-introduction-to-convolutional-neural-network-cnn-207cdb53db97>.

Fig. 51: “Architettura di una rete neurale RNN”. Fonte: <https://www.developersmaggioli.it/blog/le-reti-neurali-ricorrenti/>.

Fig. 52: “Architettura di una rete *feedforward*”. Fonte: [https://it.wikipedia.org/wiki/Rete\\_neurale\\_feed-forward](https://it.wikipedia.org/wiki/Rete_neurale_feed-forward).

Fig. 53: “Architettura di una rete *autoencoder*”. Fonte: <https://www.intelligenzaartificialeitalia.net/post/autoencoder-cosa-sono-e-come-funzionano>.

Fig. 54: “L’ascesa dei Normanni sul territorio italiano”. Fonte: Barberio L. “Architettura Normanna nel sud Italia: Il Duomo di Sant’Agata dei Goti”. Laurea Magistrale in Architettura, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2023.

Fig. 55: “Individuazione dei siti religiosi di epoca normanna”. Fonte: Barberio L. “Architettura Normanna nel sud Italia: Il Duomo di Sant’Agata dei Goti”. Laurea Magistrale in Architettura, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2023.

Fig. 56: “Architettura di epoca normanna in Campania e nel Lazio”. Fonte: Barberio L. “Architettura Normanna nel sud Italia: Il Duomo di Sant’Agata dei Goti”. Laurea Magistrale in Architettura, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2023.

Fig. 57: “La Cattedrale di San Matteo nel centro storico della città di Salerno”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 58: “Alcune delle miniature che raffigurano la traslazione del Santo Matteo”. Fonte: Braca A. “Guida illustrata alla Cattedrale di San Matteo”, Salerno: Opera edizioni, 2018.

Fig. 59: “Il riuso del Centro storico di Salerno”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 60: “Vista esterna della Cattedrale da Via Roberto il Guiscardo”. Elaborazio-

ne grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 61: “Vista esterna della Cattedrale da Via Roberto il Guiscardo”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 61 – “L’ambiente ipogeo della Cattedrale di San Matteo: la Cripta”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 62 – “L’altare di San Matteo all’interno della Cripta”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 63 – “Decorazioni della Cripta”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 64 – “Le absidi dell’ambiente ipogeo”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 65 – “Descrizione degli affreschi dell’artista Belisario Corenzio”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 66 – “Descrizione planimetrica della Cattedrale di San Matteo”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 67 – “La navata centrale e il coro ligneo”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 68 – “La navata meridionale”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 69 – “La cappella Mazza”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 70 – “Cappella De Vicaris”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 71 – “Cappella Poerio”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 72 – “Cappella SS. Trinità”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 73 – “Cappella del Pezzo”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 74 – “Cappella della Calce”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 75 – “La navata settentrionale della Cattedrale”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 76 – “Cappella del Fonte Battesimale”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 77 – “Cappella della Congrega di San Giuseppe”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 78 – “Cappella della Famiglia Pinto”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 79 – “Cappella della Famiglia Lembo”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 80 – “Cappella di Santa Maria degli Angeli”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 81 – “Cappella di San Francesco da Paola”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 82 – “Il transetto triabsidato”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 83 – “I mosaici musivi”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 84 – “Il quadriportico della Cattedrale”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 85 – “La Facciata esterna”. Fotografia a cura di Marika Falcone.

Fig. 86 – “Dettaglio della porta dei Leoni”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 87 – “Le tarsie del Quadriportico”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 88 – “Dettaglio della facciata del nartece del Quadriportico”. Elaborazione grafica a cura di Marika Falcone.

Fig. 88 – Incisione di J.L. Desprez. Fonte: Braca A. “Guida illustrata alla Cattedrale di San Matteo”, Salerno: Opera edizioni, 2018.

Fig. 90: “Schema di acquisizione (statica) della Cattedrale con Laser Scanner”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 91: “Schema di acquisizione (statica) della Cripta con Laser Scanner”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 92: “Schema di acquisizione (dinamica) della cattedrale con NavVis VLZ”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 93: “Schema di acquisizione (dinamica) della Cripta con NavVis VLZ”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 94: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Creazione del sito”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 95: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Localizzazione del sito”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 96: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Mappa dei siti attivi e da elaborare”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 97: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Selezione del sito da elaborare”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 98: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Menu, Operazioni disponibili”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 99: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Creazione del sito”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 100: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Upload dei dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 101: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Zoom mappe dei dataset”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D

Scan.

Fig. 102: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Upload dei dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 103: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Elaborazione dei dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 104: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Elaborazione dei dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 105: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Elaborazione dei dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 106: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Elaborazione dei dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 107: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Risultato dell’elaborazione dati”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 108: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Download e Management”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 109: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Management”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 110: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Allineamento dataset”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 111: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Allineamento due dataset”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 112: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Allineamento sulla mappa. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 113: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Registrazione completa dei dataset”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 114: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Registrazione completa dei dataset”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 115: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Generazione dei livelli”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 116: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Registrazione

completa dei dataset”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 117: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Suddivisione dei dataset per piano”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 118: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Creazione delle mappe per il tour fotografico”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 119: “Processamento dei dati con il software IVION NavVis – Vista della nuvola in falsi colori”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 120: “Comparazione dei dati. Distance computation. Impostazione dei parametri”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 121: “Comparazione dei dati della cattedrale. Distance computation”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 122: “Comparazione dei dati della Cripta. Distance computation”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 123: “Valori di *Roughness* di una porzione di volta”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 124: “Valori di *Roughness* della statua”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone con l’azienda 3D Scan.

Fig. 125: “Caratteristiche dei sensori utilizzati”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 126: “Risultati del processo fotogrammetrico in *Metashape - Agisoft*”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 127: “In alto: dataset acquisito con macchina fotografica. In basso: dataset acquisito con smartphone”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 128: “Allineamento e calcolo della distanza in CC”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 129: “Comparazione dei due dataset acquisiti”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 130: “Valori di *Roughness*. dataset A e dataset B”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 131: “Caratteristiche dei sensori utilizzati”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 132: “Acquisizione dati per il processo fotogrammetrico”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 133: “Risultati del processo fotogrammetrico in *Metashape - Agisoft*”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 134: “Acquisizione dati con LiDAR *low-cost*”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 135: “Processamento dei dati con app *3D Scanner*”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 136: “Confronto dei dataset. Allineamento e calcolo della distanza in CC”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 137: “Cartografia del patrimonio monumentale del centro storico di Salerno”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 138: Pianta delle coperture. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 139: “Pianta piano terra della Cattedrale”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 140: “Pianta della pavimentazione della Cattedrale”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 141: “Dettaglio della pavimentazione della navata centrale, settentrionale e meridionale”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 142: “Dettaglio della pavimentazione del transetto”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 143: “Ipografia della Cattedrale”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 144: “Pianta piano interrato della Cripta”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 145: “Pianta della pavimentazione della Cripta”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 146: “Ipografia della Cripta”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 147: “Sezione AA”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 148: “Sezione BB”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 149: “Sezione CC”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 150: “Sezione DD”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 151: “Prospetto della Facciata d’ingresso”. Elaborazione grafica a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 152: “Dataset di partenza per l’analisi statistica del modello previsionale”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 153: “Modello di regressione lineare”. Elaborazione dati a cura dell’arch. Marika Falcone.

Fig. 154: “Approccio metodologico della ricerca”. Elaborazione grafica a cura

dell'arch. Marika Falcone e dell'ing. Guido Napolitano Dell'Annunziata.

Fig. 155: “Strumenti utilizzati”. Elaborazione grafica a cura dell'arch. Marika Falcone e dell'ing. Guido Napolitano Dell'Annunziata.

Fig. 156: “Acquisizione dati con sensori low-cost”. Elaborazione grafica a cura dell'arch. Marika Falcone e dell'ing. Guido Napolitano Dell'Annunziata.

Fig. 157: “Scenario di acquisizione, veicolo dinamico e dataset con segnali di danno”. Elaborazione grafica a cura dell'arch. Marika Falcone e dell'ing. Guido Napolitano Dell'Annunziata.

## BIBLIOGRAFIA

### Bibliografia di riferimento al testo

- Abbate F. and Di Resta I. “La città nella storia d’Italia. Sant’Agata dei Goti”, Roma: Laterza editore, 1984.
- Aceto F. “La scultura dall’età romanica al primo rinascimento” in Aa. Vv., Insestamenti verginiani in Irpinia. Il goletto, Montevergine, Loreto, Ercolano, 1988.
- Aceto F. “Montecassino, in E.A.M., vol. VIII, pp. 534-543, Roma 1997.
- Aceto F. “Sui mosaici della Cattedrale di Salerno, in Rassegna Storica Salernitana, n.s.,2, pp. 88-89, 1984.
- Albawi S., Mohammed T. A., Al-Zawi S. “Understanding of a convolutional neural network.” In 2017 international conference on engineering and technology (ICET) (pp. 1-6). Ieee, 2017.
- Al-Najjar B. and Alsyouf I. “Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making” in International Journal of Production Economics 84, 85-100, 2003.
- Amarotta A. “Salerno romana e medievale. Dinamica di un insediamento”. Salerno: Pietro Laveglia, 1989.
- Andreotti N. “Il patrimonio artistico in Italia: una miniera non sfruttata”, [www.incipitmag.com](http://www.incipitmag.com), 2018.
- Apicella Memoli D. “Sichelgaita tra longobardi e normanni”, Salerno: Laveglia&Carlone, 2009.
- Apollonio F. I., Basilissi V., Callieri M., Dellepiane, M. Gaiani, M., Ponchio F., Rizzo F., Rubino A. F., Scopigno R. and Sobrà G., “A 3D-centered information system for the documentation of a complex restoration intervention”, Journal of Cultural Heritage, 29, 2018.
- Arata G. “L’Architettura Arabo-Normanna e il Rinascimento in Sicilia,

Editore: Bestetti & Tummenelli, 1925.

- Babar M., and Arif, F. “Smart urban planning using Big Data analytics to contend with the interoperability” in *Internet of Things. Future Generation Computer Systems*, 77. 10.1016/j.future.2017.07.029, 2017.
- Banu G.R. “A Role of decision Tree classification data Mining Technique” in *Diagnosing Thyroid disease. International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 4(11):111-5, 2016.
- Bartoli M., “Metodologie e strumenti di studio digitali per l’archeologia. Nuovi strumenti per la documentazione archeologica” in *Digitalia*, 2014.
- Bemporad A. “A Piecewise Linear Regression and Classification Algorithm With Application to Learning and Model Predictive Control of Hybrid Systems” in *IEEE Transactions on Automatic Control*, doi: 10.1109/TAC.2022.3183036, 2022.
- Benson T. Duarte F. and Ratti C. “From Amsterdam to New Amsterdam to Amsterdam” in *How Urban Mobility Shapes Cities*. 10.1007/978-3-031-03803-77, 2022.
- Bolton R., McColl-Kennedy J. R., Cheung L., Gallan A., Orsingher C., Witell L. and Zaki M. “Customer experience challenges: Bringing together digital, physical and social realms” in *Journal of Service Management*, 29(5), 776–808, DOI: <https://doi.org/10.1108/JOSM-04-2018-0113>, 2018.
- Borsi S. “Melfi normanna”, Libria Editore, ISBN: 9788867641314, 2018.
- Braca A. “Guida illustrata alla Cattedrale di San Matteo”, Salerno: Opera edizioni, 2018.
- Braca A. “Il duomo di Salerno. Architettura e culture artistiche del Medioevo dell’età moderna”, Salerno: Laveglia Editore, ISBN 88-88773-71-1, 2003.
- Braca A. “La pittura e i mosaici medievali a Salerno” in *Storia di Salerno*, vol. I Salerno antica e medievale, a cura di I. Gallo, pp. 187-197, 2000.
- Braca A. “Le lastre a mosaico dal Duomo di Salerno”, in *Rassegna Storica Salernitana*, n.s. 30, pp. 51-66, 1998.
- Braca A. “Oltre Montecassino. La pianta originaria del Duomo di Salerno” in *Rassegna Storica Salernitana*, n.s. 27, pp. 7-42, 1997.
- Braca A. “Salerno e la forma Urbis: iconografia ragionata della città dal Medioevo all’età moderna, in *Storia dell’Università di Salerno*, a cura di A. Musi M., M. Oldoni e A. Placanica, pp. 357-395, 2001.
- Brusaporci S. “Digital modelling and representation of architectural heritage” in *Modelli complessi per il patrimonio architettonico-urbano* a cura di Mario

Centofanti e Stefano Brusaporci. Roma: Gangemi editore, ISBN 8849226926, 2013.

- Calantropio A., Patrucco G., Sammartano G. and Teppati Losè L. “Low-cost sensors for rapid mapping of cultural heritage: first tests using a COTS Steadi-camera” in *Applied Geomatics*, n. 10, pp. 31-45, 2018.
- Campi M., di Luggo A. and Scandurra S. “3D modeling for the knowledge of architectural heritage and virtual
- Campi M., Falcone M. and Sabbatini S. Towards continuous monitoring of architecture. Terrestrial Laser Scanning and Mobile Mapping System for the diagnostic phases of the cultural heritage. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 121–127, 2022.
- Campi, M., di Luggo A. and M. Falcone, M. “Photogrammetric Processes and Augmented Reality Applications Using Mobile Devices” in *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVI-M-1, 101–6, 2021.
- Capone A. “Il duomo di Salerno, vol. I Parte storica: dalla fondazione ai giorni nostri”, Salerno 1927.
- Caputo M., Denker K. and Franz M. O. “Support Vector Machines for Classification of Geometric Primitives in Point Clouds” in *Paris, 8th International Conference on Curves and Surfaces*, 2015.
- Carucci A. “Aspetti inediti del Duomo di Salerno”, 1996.
- Carucci A. “Chronicon Salernitanum”, Salerno, 1988.
- Carucci A. “I mosaici salernitani nella storia e nell’arte”, Sorrento: Di Mauro Editore, 1983.
- Carucci A. “Il Duomo di Salerno e il suo Museo”, Scuola Arti Grafiche, Salerno, 1962.
- Carucci A. “Opulenta Salernum”, Salerno, 1990.
- Carucci A. and Pecoraro U. “Strutture architettoniche e forme d’arte della Cattedrale di Salerno: la cripta”, Salerno, 1997.
- Casiello S. “Offese di guerra. Ricostruzione e restauro nel Mezzogiorno d’Italia”. Firenze: Alinea editrice, pp. 71-79. ISBN 978-8860556479, 2011.
- Catalano M.I. “Scultori toscani a Napoli alla fine del Cinquecento. Considerazioni e problemi” in *S.d.A.*, 54, pp. 123-132, 1985.
- Cera V. and Campi M. “Segmentation protocols in the digital twins of monumental heritage: a methodological development” in. 14. 14.1-14.10. 10.20365/

disegnarecon.26.2021.14, 2021.

- Chatfield C. “Time-series forecasting” in Chapman and Hall/CRC press, [https://doi.org/10.1201/9781420036206\\_2000](https://doi.org/10.1201/9781420036206_2000).
- Chen T., Keravnou-Papailiou E., and Antoniou G. “Medical analytics for healthcare intelligence—Recent advances and future directions” in *Artificial Intelligence in Medicine*, 112, 1-5, 2021.
- Chiabrando F., Costamagna E. and Spanò A. “Passive optical sensors and related image matching methods for 3D modeling” in *Territorio Italia*, 2013.
- Chiabrando F., Della Coletta C., Sammartano G., Spanò A. and Spreafico A. “Torino 1911 project: a contribution of aSLAM-based survey to extensive 3D heritage modeling” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2), 2018.
- Chiarenza S. and Messina B. “Geometry and Art in Decorative Panels of Salerno Cathedral’s Floor”. 10.1007/978-3-030-47983-1\_61, 2020.
- Chierici G. “Il Duomo di Salerno e la chiesa di Montecassino”, in *Rassegna Storica Salernitana*, pp. 95-109, 1937.
- Cielo L.R. “Monumenti romanici a Sant’Agata dei Goti. Il duomo e la chiesa di San Menna, Roma, 1980.
- Cifarelli F. and Santoro U. “Il centro antico di Salerno attraverso l’analisi dell’ambiente fisico” in *Apollo* n.s. XI, pp. 102-115, 1995.
- Colonna M.A. “De vita et gestis Beati Matthei Apostoli et Evangelistae”, Napoli, 1580.
- Coppola G. “L’architettura dell’Italia meridionale in età normanna. Secoli XI-XII in Artemisia editore, collana Mezzogiorno Mediterraneo, ISBN: 8890183497, 2005.
- Cortese B. “Patrimonio culturale, diritto e storia” in *Patrimonio culturale profili giuridici e tecniche di tutela* (a cura di) Battelli E., Cortese B., Gemma A., Massaro A. Roma: Edizioni RomaTrePress, ISBN 9788897524953, 2017.
- Croce V., Caroti G., De Luca L., Jacquot K., Piemonte A. and Véron, P. “From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semiautomatic Approach Exploiting Machine Learning” in *Remote Sensing*. 13. 461. 10.3390/rs13030461, 2021.
- De Angelis “Il Duomo di Salerno nella sua millenaria storia, nelle sue vicende e nei suoi monumenti”, Salerno, 1936.
- De Luca L., Bussayarat C., Stefani C., Veron P. and Florenzano M. “A semanti-

cbased platform for the digital analysis of architectural heritage”, in *Computers & Graphics*, 35(2), 227-241, 2011.

- di Luggo A. “Il rilievo e la conoscenza di per la riqualificazione dei centri urbani. Un caso applicativo per il recupero di Palazzo Penne” in *Palazzo Penne a Napoli tra conoscenza, restauro e valorizzazione* (a cura di) Campi M., di Luggo A. Picone R., Scala P. Napoli: Arte’m, p.17. ISBN 9788856906004, 2018.
- Delogu P. “I normanni in Italia. Cronache della conquista e del regno”, Napoli: Liguori editore, ISBN 8820713128, 1984.
- Delogu P. “Mito di una città meridionale: Salerno”, secoli VIII-IX. Napoli: Liguori editore, 1977.
- Di Domenico G., Galante M. and Pontrandolfo A. “Opulenta Salernum. Una città tra mito e storia”. Roma: Gangemini editore, ISBN 9788849239201, 2020.
- Di Luggo A., Campi M., Repola L., Cera V., Scandurra S., Pulcrano M. and Falcone M. “Evaluation of historical heritage documentation: reality based survey and derivative models” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019.
- Di Martino S. and Origlia A. “Exploiting Recurring Patterns to Improve Scalability of Parking Availability Prediction Systems” in *Electronics* 9.5, p. 838, 2020.
- Di Mauro L. “L’età della Repubblica di Amalfi e la conquista normanna”, in *La Voce della Campania*, n. 6, Salerno, pp. 183-198, 1979.
- Di Stefano R. “Salerno. La cattedrale di San Matteo”, Salerno, 1986.
- Dietze F., Karoff J., Calero Valdez A., Ziefle M., Greven C. and Schroeder U. “An Open-Source Object-Graph-MappingFramework for Neo4j and Scala: Renesca” in *International Conference on Availability, Reliability, and Security*. 204–218, 2016.
- Docci M. and Bianchini C. “Il ruolo dei modelli virtuali 3D nella conservazione del patrimonio architettonico ed archeologico” in *Disegnare idee ed immagini*, n.53, pp. 3-4, 2016.
- Docci M. and Maestri M. “Manuale di rilevamento architettonico e urbano”. Roma: Laterza Edizioni, ISBN 9788858141854, 2020 (edizione IV).
- Drakopoulos G., Kanavos A., Makris, C. and Megalooikonomou V. “On converting community detection algorithms for fuzzy graphs in Neo4j” in *Proceedings of the 5th International Workshop on Combinations of Intelligent- Methods and Applications*, CIMA, 2015.
- Draper N.R. and Smith H. “Applied Regression Analysis” in *Wiley-Interscience*. ISBN 0-471-17082-8, 1998.

- Dudek G. "Pattern-based local linear regression models for short-term load forecasting" in *Electric power systems research* 130, pp. 139-147, 2016.
- Drazin S. and Montag M. "Decision tree analysis using weka". *Machine Learning-Project II*, University of Miami. 2012:1-3, 2012.
- Dulli S., Furini S., Peron E. "*Data mining: Metodi e strategie*". Springer editore, ISBN 978-8847011625, 2009.
- Evans S. "Beyond buzzwords: the true meaning and value of digital twin" in <https://www.snclavalin.com/en/beyond-engineering/beyond-buzzwords-the-true-meaning-and-value-of-digital-twins>, 2019.
- Falcone M., Campi M. "Il Quadriportico della Cattedrale di S. Matteo: sensori low cost per rilievi di rapid mapping/ The Quadriportico of the Cathedral of S. Matteo: Low-cost Sensors for Rapid Mapping Surveys" in Arena A., Arena M., Mediatì D., Raffa P. (a cura di). *Connettere. Un disegno per annodare e tessere. Linguaggi Distanze Tecnologie. Atti del 42° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione/Connecting. Drawing for weaving relationship. Languages Distances Technologies. Proceedings of the 42th International Conference of Representation Disciplines Teachers*. Milano: FrancoAngeli, pp. 2283-2300. ISBN 978883512589, 2021.
- Falcone M., Origlia A., Campi M. and De Martino S. "From architectural survey to continuous monitoring: graph-based data for management for cultural heritage conservation with digital twins" in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B4-2021 - XXIV ISPRS Congress (2021 edition)*, pp. 47-53, 2021.
- Fassmeyer P., Kortmann F., Drews P., Funk B. "Towards a Camera-Based Road Damage Assessment and Detection for Autonomous Vehicles: Applying Scaled-YOLO and CVAE-WGAN," 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625213, 2022.
- Fayyad U., Piatetsky-Shapiro G. and Smyth P. "From data mining to knowledge discovery in databases" in *AI magazine* 17.3, pp. 37-37, 1996.
- Fei T., Xiao B., Qi Q., Cheng J. and Ji P. "Digital twin modeling" in *Journal of Manufacturing Systems* 64, 372-389, 2022.
- Fiorillo F., Remondino F., Barba S., Santoriello A., De Vita C. and Casellato A., "3D digitization and mapping of heritage monuments and comparison with historical drawings". *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, 2013.
- Fiorini A. "Scansioni dinamiche in archeologia dell'architettura: test e valutazioni metriche del sensore LiDAR di Apple," in A. Arrighetti, R. Pansini (eds.), *Sistemi e tecniche di documentazione, gestione e valorizzazione dell'architettura*

- storica. Alcune recenti esperienze*, «Archeologia e Calcolatori», 33.1, pp. 35-54, 10.19282/ac.33.1.2022.03., 2022
- Fontana D. "Libro secondo in cui si ragiona di alcune fabbriche fatte a Roma et in Napoli", 1604, Napoli.
- Franciulli M.A "La dinamica edilizia del Plaio Montis di Salerno in *Rassegna Storica Salernitana*, n20, pp. 73-74, 1993.
- Gandolfo F. "La cattedrale di Amalfi" in *Amalfi*, 1992.
- Gandolfo F. "La scultura normanna-sveva" in *Campania*, Bari, 1999.
- Gonzalez-Dominguez J., Lopez-Moreno I., Moreno P. "Frame-by-frame language identification in short utterances using deep neural networks", in *Neural Networks*, v.64, pp. 49-58, ISSN 0893-6080, <https://doi.org/10.1016/j.neu-net.2014.08.006>, 2015.
- Grieves M. "Digital Twin: Manufacturing Excellencethrough Virtual Factory Replication" in *A White Paper*, LLC,Melbourne, 2019.
- Grieves M. and Vickers J. "Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior" in *complexsystems in f.-j. kahlen, s. flumerfelt and a. alves (eds.), Transdisciplinary perspectives on complex systems*,Springer, Cham, 85-113, 2017.
- Grilli E., Dinunno, D., Petrucci G. and Remondino F. "From 2D to 3D Supervised Segmentation and Classification for Cultural Heritage Applications" in *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5, Volume XLII-2, pp. 399-406, 2018;
- Grilli E., Menna F. and Remondino, F. "A Review of Point Clouds Segmentation and Classification Algorithms" in *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2, Volume XLII-2/W3, pp. 339-344, 2017.
- Guidi G., Russo M. and Anghelèddu D. "3D survey and virtual reconstruction of archaeological sites. Digital Applications", in *Archeology and Cultural Heritage*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2014.01.001>, 2014.
- Guidi G., Russo M. and Beraldin J.A. "Acquisizione 3D e modellazione poligonale" in *MCGraw-Hill*, 2010.
- Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. "The Elements Of Statistical Learning: Data Mining, Inference, And Prediction", Second Edition (springer Series In Statistics), ISBN 978-0387848570, 2009.
- Jayakameswaraiah M and Ramakrishna S. "Implementation of an Improved ID3 Decision Tree Algorithm" in *Data Mining System. International Journal of Computer Science andEngineering*Volume-2, Issue-3 E-ISSN. 2014.

- Jiménez P., Villalba Diez, J. and Ordieres-Mere, J. “Visualization with Neo4j. Empowering Leaders to Operationalize Lean Structural Networks” in *Procedia CIRP* 55284–289, 2016.
- Kagaya H., Aizawa K., Ogawa M. “Food detection and recognition using convolutional neural network.” In *Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia*, pp. 1085-1088, 2014.
- Lewis-Beck C. and Lewis-Beck M. “Applied regression: An introduction”, Vol. 22. Sage publications, 2015.
- Liang D., Frederick, D., Lledo E., Rosenfield R., Berardi V., Linstead E., Maoz U. “Examining the utility of nonlinear machine learning approaches versus linear regression for predicting body image outcomes” in *The U.S. Body Project I, Body Image*, Volume 41, pp. 32-45, ISSN 1740-1445, <https://doi.org/10.1016/j.bodyim.2022.01.013>, 2022.
- Liu W., Wang Z., Liu X., Zeng N., Liu Y, Alsaadi E. “A survey of deep neural network architectures and their applications” in *Neurocomputing*, v. 234, pp. 11-26, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.12.038>, 2017.
- Luhmann T., Robson S., Kyle S. and Boehm J. “Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging”, Berlin, Boston: De Gruyter, 2020. <https://doi.org/10.1515/9783110607253>, 2020.
- Madni A. M., Madni C. C. and Lucero S. D. “Leveraging Digital Twin Technology” in *Model-Based Systems Engineering Systems*, 7, 7, 2019.
- Maset E., Valente R., Iamoni M., Haider M. and Fusiello A. “Integration of photogrammetry and portable mobile mapping technology for 3d modeling of cultural heritage sites: the case study of the bziza temple” in *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLIII-B2-2022. 831-837. 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-831-2022, 2022.
- Matarazzo T., Santi P. & Pakzad S. Carter K. Ratti C., Moaveni B. Osgood C. and Jacob N. “Crowdsensing Framework for Monitoring Bridge Vibrations Using Moving Smartphones” in *Proceedings of the IEEE*. 106. 10.1109/jproc., 20182808759, 2018.
- Matheus C., Chan P. and Piatetsky-Shapiro G. “Systems for knowledge discovery in database” in *IEEE Transactions on knowledge and data engineering* 5.6, pp. 903–913, 1993.
- McCulloch W.S. and Pitts W. “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity” in *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), pp.115-133. 5, <https://doi.org/10.1007/BF02478259>, 1943
- Messaoudi T., De Luca L. e Véron P. “Towards an Ontology for Annotating Degradation Phenomena”, *Proceedings of Digital Heritage International Congress DH’15*, pp. 1-4, 2015.
- Messaoudi T., Véron P., Halin G. and De Luca L., “An ontological model for the reality-based 3D annotation of heritage building conservation state”, *Journal of Cultural Heritage*, 29, 100-112, 2008.
- Mishra N and Sanjay S. “Predictive analytics: A survey, trends, applications, opportunities and challenges”, in *(IJCSIT) International Journal of Computer Science and Information Technologies*, pages 4434–4438, 2012.
- Mueller P, Zeng G., Wonka P. and Van Gool L. “Image-Based Procedural Modeling of Facades”, *ACM*
- Murphy M., MCGovern, E. and Pavia S. “Historic building information modeling (HBIM)” in *Structural Survey* 27 (4), 311–327, 2009.
- Nocerino E., Menna F., Remondino F., Toschi I. and Rodríguez-González P. “Investigation of indoor and outdoor performance of two portable mobile mapping systems” in *Proceedings of SPIE 10332, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIV*, 103320I, DOI:10.1117/12.2270761, 2017.
- O’Shea K., Nash, R. “An introduction to convolutional neural networks.” *arXiv preprint arXiv:1511.08458*, 2015.
- Oyeleye M., Chen T., Titarenko S. and Antoniou G. “A Predictive Analysis of Heart Rates Using Machine Learning Techniques” in *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(4):2417. <https://doi.org/10.3390/ijerph19042417>, 2022.
- Pace V. “Nuovi spazi e nuovi temi nella scultura italo-meridionale della prima età normanna in Medioevo: immagine e racconti” in *atti del convegno internazionale di studi Parma 27-30 settembre 2000*, Milano, 2003.
- Pace V. “Roberto il Guiscardo e la scultura “normanna” dell’XI secolo in Campania, a Venosa e a Canosa” in *Roberto il Guiscardo tra Europa, Oriente e mezzogiorno*, Galatina, 1990.
- Palmentieri A. “Il reimpiego dei sarcofagi romani a Salerno”, in *Opulenta Salernum. Una città tra mito e storia*. Roma: Gangemini editore, ISBN 9788849239201, 2020.
- Pane R. “Attualità e dialettica del restauro: educazione all’arte, teoria della conservazione e del restauro dei monumenti “antologia a cura di Mauro Civita, Chieti: M. Solfanelli, 1987, p. 117. ISBN 8874972407.
- Patel P. and Prajapati P. “Study and Analysis of Decision Tree Based Classification Algorithms” in *International Journal of Computer Sciences and Engineering*. 6. 74-78. 10.26438/ijcse/v6i10.7478, 2018.

- Piatetski-Shapiro G. and Frawley W. “Knowledge Discovery in Databases”. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1991.
- Piatetski-Shapiro G., Frawley W. and Matheus C. “Knowledge Discovery in Databases: An Overview” in *Advances in knowledge discovery and data mining*, 1(35), 12, 1992.
- Ratti C. and Claudel M. “La città di domani. Come le reti stanno cambiando il futuro urbano”. Torino: Einaudi editore, ISBN 9788806225223, 2017.
- Remondino F. and El-Hakim, S. “Image-based 3D Modelling: A Review” in *The Photogrammetric Record*. 21. 269 - 291. 10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x., 2006.
- Remondino, F. and Rizzi, A. “Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites - techniques, problems, and examples” in *Applied Geomatics* 2, 85–100. doi.org/10.1007, s12518-010-0025-x, 2010.
- Robinson I., Webber J. and Eifrem E. “Graph databases”, O’Reilly Media, Inc., 2013.
- Rosi G. “L’atrio della cattedrale di Salerno” in *B.d.A*, XXXIV, pp. 225-238, 1948.
- Roussel R., Bagneris Marine L., Livio and Bomblet P. “A digital diagnosis for the «autumn» statue (marseille, france) : photogrammetry, digital cartography and construction of a thesaurus” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-2/W15. 1039-1046. 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-1039-2019.
- Russo M., Giugliano A.M. and Ascitti M. “Mobile phone imaging for CH façade modelling” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, n. XLII-/W17, pp. 287-294, 2019.
- Russo M., Remondino F. and Guidi G. “Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico” in *Archeologia e Calcolatori*, n. 22, Edizioni All’insegna del Giglio s.a.s., pp.169-198, ISSN: 1120-6861, ISBN: 978-88-7814-526-9, 2011.
- Safavian S.R. and Landgrebe D. “A survey of decision tree classifier methodology in IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 21(3):660–674, 1991.
- Salazar Miranda A., Fan Z., Duarte F. and Ratti C. “Desirable streets: Using deviations in pedestrian trajectories to measure the value of the built environment.” in *Computers, Environment and Urban Systems*. 86. 101563. 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101563, 2021.
- Sammartano G. “Optimization of 3D multi-sensor models for damage assessment in emergency context: first tests on rapid mapping” in the 2016 Italian earthquake, in F. Remondino, A. Georgopoulos, D. Gonzalez-Aguilera, P. Agrafiotis (Eds.), *Latest Developments in Reality-Based 3D Surveying and Modeling*, MDPI 2017, pp. 141-168, 2016.
- Sansonetti G., Gasparetti F., Micarelli A., Cena F. and Gena C. “Enhancing cultural recommendations through social and linked open data” in *User Modeling and User-Adapted Interaction* 29, 1, 121–159, 2019.
- Santagati C. and La Russa, F. “Historical sentient – building information model: a digital twin for the management of museum collections in historical architectures”. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLIII-B4-2020. 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-755-2020, 2020.
- Schiavo A. “Note sul Duomo di Salerno” in *Rassegna Storica Salernitana*, pp. 241-243, 1947.
- Schiavo A. “Il quadriportico della duomo di Salerno” in *L’Osservatorio Romano*, 1974.
- Schiavo A. “L’architetto Carlo Buratti” in *Miscellanea della Società Romana di Storia Patria*, Roma, 1995.
- Schuld M., Sinayskiy I. and Petruccione F. “Prediction by linear regression on a quantum computer”, in *American Physical Society* v.94, doi:10.1103/PhysRevA.94.022342, 2021.
- Spreafico A., Chiabrando F., Giulio Tonolo F., Teppati Losè L. “The iPadPro built-in LiDAR sensor: 3D rapid mapping tests and quality assessment,” in N.Paparoditis, C. Mallet, F. Lafarge, M.Y. Yang, S. Hinz, R.Q. Feitosa, M. Weinmann, B. Jutzi (eds.), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLIII-B1-2021, 63-69 (<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>), 2021.
- Teppati Losè L., Spreafico A., Chiabrando F., Giulio Tonolo, F. “Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain.” *Remote Sens.* 14, 4157, 2022.
- Teruggi S., Grilli E., Fassi F. and Remondino F. “3D surveying, semantic enrichment and virtual access of large cultural heritage” in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. VIII-M-1-2021. 155-162. 10.5194/isprs-annals-VIII-M-1-2021-155-2021, 2021.
- Theobald O. “Machine Learning for Absolute Beginners: A Plain English Introduction”. Scatterplot Press editore, 2017. ISBN 9781549617218.
- Theobald O. “Machine Learning For Absolute Beginners: A Plain English Introduction: 3 (AI, Data Science, Python & Statistics for Beginners)”, Worldof-book, UK, ISBN 9781549617218, 2017

- Tramontana S. “Il Mezzogiorno medievale. Normanni, svevi, angioini, aragonesi nei secoli XI-XV”, Roma. Carrocci, ISBN 978-88-430-1790-4, 2000.
- Tucci G., Visintini D., Bonora V. and Parisi E. I. “Examination of indoor mobile mapping systems in a diversified internal/external test field” in *Applied Sciences*, 8(3), 401, 2018.
- Vaccaro M. “Palinsesto e paradigma. La metamorfosi monumentale nella Salerno di Roberto il Guiscardo”, Pisa: Edizioni ETS, 2018.
- Voltini F., Remondino F., Pontin M., Girardi S., Rizzi A. and Gonzo L., “Integrazione di fotogrammetria e laser scanner per la documentazione di beni culturali” in *Proc. of X ASITA Conference*, Bozen, 2006.
- Vosselman G., “Design of an indoor mapping system using three 2D laser scanners and 6 DOF SLAM” in *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, II-3, 2014.
- Webber J. “A programmatic introduction to Neo4j” in *Proceedings of the 3rd annual conference on Systems, programming, and applications: software for humanity*. ACM, 217–218, 2012.
- Weinmann M. “Reconstruction and Analysis of 3D Scenes” in *Springer International Publishing: Cham, Switzerland*. ISBN 978-3-319-29244-1, 2016.
- Witten I.H., Frank E., Hall M.A. and Pal, C.J. “Data Mining: Practical machine learning tools and techniques” a volume in *The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems*, ISBN 9780123748560, 2011.
- Yamashita R., Nishio M., Do R. K. G., Togashi, K. “Convolutional neural networks: an overview and application in radiology.” *Insights into imaging*, 9(4), pp. 611-629, 2018.
- Yan X and Xiao G.S. “Linear regression analysis.” In *Theory and Computing*, 2003.
- Yeardeley, A., Ejeh J. Allen L., Brown S. and Cordiner J. “Predictive Maintenance” in *the Digital Era*. 10.1016/B978-0-323-95879-0.50234-4, 2022.
- Yingjun Ji, Shixin Liu, Mengchu Zhou, Ziyang Zhao, Xiwang Guo, Liang Qi. “A machine learning and genetic algorithm-based method for predicting width deviation of hot-rolled strip in steel production systems” in *Information Sciences*, Volume 589, pp. 360-375, ISSN 0020-0255, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.12.063>, 2022.
- Zamboni A. “Le nostre città sotto una nuova luce” in *Domus*, n.966 – Novembre, 2015.
- Zhang L., Yang F., Zhang Y. D., Zhu Y. J. “Road crack detection using deep convolutional neural network.” In *2016 IEEE international conference on ima-*

ge processing (ICIP) (pp. 3708-3712). IEEE, 2016.

## Tesi

- Barberio L. “Architettura Normanna nel sud Italia: Il Duomo di Sant’Agata dei Goti”. Laurea Magistrale in Architettura, Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2023.
- Cera V. “Il rilievo dell’Architettura tra identificazione tipologica e strutturazione semantica. La Certosa di San Lorenzo a Padula nella rappresentazione digitale per il Cultural Heritage”. Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Architettura. – XXXI ciclo, 2019
- Croce V. “Semantic annotation transfer and retrieval for architectural heritage. A methodological system combining Artificial Intelligence, H-BIM and collaborative reality-based annotation platforms”. Dottorato internazionale di ricerca in ingegneria civile ed ambientale. Università degli studi di Pisa e Firenze. – XXXIV ciclo.
- Cafasso R. “Esplorazione degli algoritmi di Classificazione per la manutenzione predittiva nell’era dell’Industry 4.0”. Corso di laurea in Ingegneria Gestionale. Politecnico di Torino, 2020.
- Caputo A. “Smart Cities: una metodologia data-driven per la predizione del Bus Passenger Load”. Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi di Napoli Federico II, 2020.
- Carioli G. “Cancer mortality data analysis and prediction”. Università degli Studi di Milano, Dipartimento di Scienze Cliniche e di Comunità. Dottorato di Ricerca in Epidemiologia, Ambiente e Sanità Pubblica – XXXI ciclo, 2018.
- Cioffi E. “Una Metodologia per migliorare la scalabilità di sistemi di predizione di parcheggi, basata su Pattern spazio-temporali ricorrenti”. Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi di Napoli Federico II, 2020.
- Grilli E., “*Automatic classification of architectural and archaeological 3D Data*”, Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Architettura, XXXII ciclo, 2020.
- Maida R. “La tutela del patrimonio culturale in tempo di pace e nei conflitti armati”. Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento di Architettura e Territorio dArTe. Dottorato di Ricerca in Architettura e Territorio – XXXI ciclo, 2018.
- Milazzo V. “Nuove tecnologie per la documentazione metrica e la visualizzazione del Patrimonio Culturale”. Corso di laurea magistrale in

Architettura per il Restauro e Valorizzazione del Patrimonio. Politecnico di Torino. 2020.

- Di Torrepadule R. “Un sistema basato su AI per la gestione della rete di mobilità in una Smart City” Corso di laurea magistrale in informatica. Università degli studi di Napoli Federico II, 2020.

- Russo M. “Rilievo di forme complesse tramite Reverse Modeling integrato”. Politecnico di Milano, Dottorato di Ricerca in Disegno e metodi di sviluppo prodotto, XIX ciclo.

- Scandurra S. “Processi di traduzione dei dati di rilievo strumentale per la realizzazione di modelli informativi del Patrimonio Architettonico esistente”. Università degli Studi di Napoli, Dipartimento di Architettura. – XXXII ciclo. 2020



**Marika Falcone** (1993) si laurea nel 2018, con lode in Architettura presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, con una tesi in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura dal titolo "*La Casa Bassa tra rilievo e conoscenza. La Certosa di San Lorenzo a Padula*". Dal 2019 è cultrice della materia per il settore disciplinare ICAR-17. Svolge attività di ricerca nell'ambito del rilievo architettonico e urbano con particolare attenzione alle tecniche di rilievo *Mobile Mapping* e ai sistemi previsionali basati su applicazioni di Intelligenza Artificiale.

