

# **I chiostri nell'area mediterranea tra XI e XIII secolo.**

## **Architettura, archeologia, arte**

a cura di Arianna Carannante e Fabio Linguanti





# **3** ARCHItettura MEDievale

# ARCHItettura MEDievale

Collana editoriale, volume n. 3

*Direttori della collana:* Silvia Beltramo e Carlo Tosco

Terzo volume *I chiostrì nell'area mediterranea tra XI e XIII secolo.*

*Architettura, archeologia, arte*

*Curatori*

Arianna Carannante e Fabio Linguanti

*Comitato scientifico internazionale*

Xavier Barral i Altet, Tancredi Bella, Giovanni Coppola, Andreas Hartmann-Virnich,  
Carlo Tosco, Rosario Vilaro

*Comitato editoriale*

Arianna Carannante, Fabio Linguanti, Ilaria Papa

I contributi sono stati oggetto di duplice *peer review* grazie alla cortese disponibilità di revisori italiani e stranieri.

Tutte le immagini pubblicate sono state soggette a comunicazione del proposito di pubblicare, come da circolare n. 33 del 7 settembre 2017 della Direzione Generale Archivi del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo.

Le fotografie all'interno dei singoli contributi sono degli Autori, ove non diversamente indicato, o autorizzate alla pubblicazione.

La presente pubblicazione è finanziata dalla Regione Siciliana (Dipartimento Regionale Beni Culturali e I.S.), Laboratoire d'Archéologie médiévale et Moderne en Méditerranée (Aix-Marseille Université), Arcidiocesi di Messina, Lipari, S. Lucia del Mela e Comune di Lipari.



Regione Siciliana  
Assessorato dei Beni Culturali  
e dell'Identità Siciliana



Dipartimento Beni Culturali  
e Identità Siciliana



PARCO ARCHEOLOGICO  
ISOLE EOLIE  
Museo Luigi Bernabò Brea



Comune di Lipari

ISSN 2785-4663

e-ISSN 2785-4566

ISBN 978-88-9285-284-6

e-ISBN 978-88-9285-285-3

© 2024 All'Insegna del Giglio s.a.s.



OPEN ACCESS (CC BY-NC-ND 4.0)  
Attribuzione - Non commerciale  
Non opere derivate 4.0 Internazionale

All'Insegna del Giglio s.a.s

via A. Boito, 50-52

50019 Sesto Fiorentino (FI)

[www.insegnadelgiglio.it](http://www.insegnadelgiglio.it)

Stampato a Sesto Fiorentino (FI)

Settembre 2024, BDprint

**I chiostri nell'area mediterranea  
tra XI e XIII secolo.  
Architettura, archeologia, arte**

a cura di

Arianna Carannante e Fabio Linguanti



*A Luigi Bernabò Brea*





# Indice

Presentazioni . . . . .	11
Da Lipari al mediterraneo: forme, idee e scambi culturali per la costruzione dei chiostri medievali . . . . .	21
<i>Arianna Carannante, Fabio Linguanti</i>	
Introduction. Les cloîtres médiévaux dans l'historiographie de l'art: quelques étapes . . . . .	27
<i>Xavier Barral i Altet</i>	
<b>A. Lipari: il chiostro di San Bartolomeo</b>	
Il chiostro di San Bartolomeo a Lipari. Nuovi elementi per la datazione del cantiere . . . . .	51
<i>Fabio Linguanti</i>	
Tra restauri e indagini archeologiche: la scoperta del chiostro normanno di San Bartolomeo a Lipari . . . . .	67
<i>Rosario Vilardo</i>	
Le produzioni ceramiche dallo scavo del chiostro di Lipari. Secoli di relazioni e scambi commerciali interrotti dal saccheggio del 1544 . . . . .	77
<i>Elvira D'Amico</i>	
<b>B. Progetto e costruzione dei chiostri: storia dei cantieri</b>	
La <i>formosa deformitas</i> nei chiostri siciliani del XII secolo . . . . .	95
<i>Francesco Gandolfo</i>	
Cloîtres romans 'méditerranéens' en Provence et en Catalogne: l'exemple d'Arles, Gérone et Sant Cugat del Vallès. Plaidoyer pour une approche archéologique de leur construction . . . . .	111
<i>Heike Hansen</i>	
Il cenobio di San Giorgio Maggiore a Venezia. Archeologia e storia dell'architettura per ricostruire i chiostri medievali . . . . .	125
<i>Sara Bini, Gianmario Guidarelli</i>	
Processi costruttivi standardizzati nei chiostri medievali di Viterbo . . . . .	137
<i>Renzo Chiovelli, Giulia Maria Palma, Vania Rocchi</i>	
Il chiostro racconta. Il complesso di San Francesco delle Monache di Aversa . . . . .	151
<i>Italia Caradonna</i>	

La decorazione scultorea nei chiostri medievali della Basilicata: temi e iconografie . . . . .	163
<i>Chiara Audizi</i>	

### **C. La diffusione dei modelli**

Archéologie et recherches sur les premiers cloîtres . . . . .	177
<i>Fabrice Henrion, Christian Sapin</i>	
San Vincenzo al Volturno e il problema dell' "iperchiostro" . . . . .	193
<i>Federico Marazzi, Nicodemo Abate, Alessia Frisetti</i>	
Chiostri capitolari della prima età romanica: la scoperta di una rara sopravvivenza nella cattedrale di Terracina . . . . .	211
<i>Maria Teresa Gigliozzi</i>	
La circolazione di modelli: i chiostri dei monasteri benedettini in Terra di Bari (X-XIII secolo) . . . . .	223
<i>Arianna Carannante</i>	
Il Castellaccio di Monreale e il suo 'chiostro' . . . . .	239
<i>Ferdinando Maurici</i>	

### **D. Relazioni con le chiese e gli ordini religiosi: chiostri abbaziali, conventuali e canonicali**

Le <i>claustrum</i> de l'abbaye de Saint-Gilles-du-Gard: recherches archéologiques sur l'infortune d'un espace monastique roman méditerranéen . . . . .	259
<i>Andreas Hartmann-Virnich, Heike Hansen</i>	
Le cloître de l'abbaye de Sénanque et le concept d'"art cistercien": premières réflexions . . . . .	271
<i>Sylvain Demarthe</i>	
Il chiostro dell'abbazia cistercense di Fontfroide (Aude) . . . . .	281
<i>Yoshie Kojima</i>	
Chiostri mendicanti tra Duecento e Trecento: spazi e architetture da Genova a Palermo . . . . .	293
<i>Silvia Beltramo</i>	
Un chiostro per una comunità monastica in espansione: San Venerio del Tino. . . . .	309
<i>Simone Caldano</i>	
Modelli digitali complessi per l'analisi dei chiostri di Fossanova e Casamari . . . . .	321
<i>Roberto Barni, Emanuele Gallotta, Carlo Inglese</i>	
Il chiostro del monastero di San Benedetto a Conversano (BA) . . . . .	337
<i>Maria Cristina Rossi</i>	

Il chiostro delle benedettine di <i>Santa Maria Veterana</i> a Brindisi: forma e funzione di uno degli spazi claustrali pugliesi meglio conservati dell'XI secolo . . . . .	349
<i>Teodoro De Giorgio</i>	
Sul perduto chiostro della cattedrale normanna di Catania. Qualche documento per nuove considerazioni . . . . .	359
<i>Tancredi Bella</i>	
Il chiostro monastico nella Sardegna del XII-XIII secolo, architettura e opere scultoree superstiti. . . . .	373
<i>Andrea Pala, Valeria Carta</i>	
 <b>E. Ricostruzioni, incompiuti, <i>revival</i> e restauri</b>	
Le cloître de l'abbaye de Saint-Michel de Cuxa, de la destruction à la renaissance (1790-1970) . . . . .	389
<i>Olivier Poisson</i>	
Cultivating the Wilderness: The Cloister of Saint-Guilhem-le-Désert between France and New York . . . . .	405
<i>Julia Perratore</i>	
Il chiostro romanico di Sant'Andrea a Genova: memoria e conservazione del paesaggio urbano . . . . .	419
<i>Alessandra Panicco</i>	
Restauro, riuso e valorizzazione dei chiostri francescani a Ravenna: un 'ripercimento critico', attraverso le fonti storiche, delle trasformazioni architettoniche dalle origini a oggi. . . . .	431
<i>Alessandra Cattaneo, Marco Pretelli</i>	
Il monastero di San Giovanni Evangelista a Ravenna. . . . .	445
<i>Dino Lombardo</i>	
Il Camposanto di Pisa: rilievi, ricostruzioni e sperimentazioni digitali per il cantiere di restauro di un chiostro medievale . . . . .	455
<i>Giovanni Pancani, Matteo Bigongiari</i>	
I chiostri di Monreale e Cefalù tra dibattiti e de-restauri . . . . .	469
<i>Renata Prescia, Fabrizio Giuffrè</i>	
Il chiostro di San Giovanni degli Eremiti di Palermo: fra documento autentico, restauri e proposta di fruizione e valorizzazione. . . . .	483
<i>Rosario Scaduto</i>	
Abstracts . . . . .	497



*fig. 1* – Pisa. Piazza  
dei miracoli. Camposanto  
(foto di Giovanni Pancani).

GIOVANNI PANCANI, MATTEO BIGONGIARI

## **Il Camposanto di Pisa: rilievi, ricostruzioni e sperimentazioni digitali per il cantiere di restauro di un chiostro medievale**

### **1. Introduzione**

Il presente contributo mira a descrivere il progetto di ricerca sulla documentazione morfometrica digitale del Camposanto Pisano, un monumento di eccezionale fattura, sia nelle caratteristiche architettoniche che nelle arti decorative, dalle pitture parietali, alla scultura, alle lapidi, tombe e sarcofagi che nel tempo sono state accolte nelle sue gallerie. Nel XIX secolo è stato uno dei monumenti italiani medievali più celebri,<sup>1</sup> mostrando un medioevo mediterraneo dove tra pietre locali, sarcofagi romani e reliquie islamiche veniva rappresentata per immagini la retorica comunicativa trecentesca.<sup>2</sup>

Il Camposanto (*fig. 1*) è stato concepito a partire dal 1278, ad opera dell'architetto Giovanni di Simone, come un edificio posto nello spazio settentrionale tra il battistero ed il duomo, completando in questo modo i principali monumenti che rendono celebre oggi la piazza dei Miracoli. I volumi architettonici si configurano come un colossale chiostro formato da quattro gallerie che inquadrano un prato dove, leggenda vuole, furono sparse le terre portate dall'arcivescovo Ubaldo Lanfranchi di ritorno dalle crociate. Il cantiere di costruzione, iniziato a sei anni dalla battaglia della Meloria, che evidenziò la fine dell'egemonia pisana, ebbe suo completamento nel corso del Trecento, così come la maggior parte dei cicli pittorici che affrescano le pareti.<sup>3</sup>

L'architettura del Camposanto ha attirato da sempre le attenzioni dei principali architetti e viaggiatori che dall'Ottocento lasciano numerose testimonianze sia sullo stato di allestimento e conservazione di questo monumento, che sullo stupore e ammirazione che era riuscita a scaturire in loro<sup>4</sup>.

Gli eventi della Seconda Guerra Mondiale portarono all'incendio delle sue coperture e al cedimento delle strutture lignee che causarono la rovina di numerose sculture ed affreschi in particolare per lo sciogliersi

<sup>1</sup> Sulla fortuna del monumento in periodo ottocentesco vedi il contributo di Mazzoca in BARACCHINI CASTELNUOVO 1996.

<sup>2</sup> Vedi Enrico Castelnuovo in BARACCHINI CASTELNUOVO 1996.

<sup>3</sup> Le pareti furono affrescate a partire dal Trecento dai più importanti autori del periodo come il pisano Francesco Traini, e da pittori fiorentini come Buffalmacco, Stefano Fiorentino, Taddeo Gaddi, Andrea da Firenze, Antonio Veneziano, Spinello Aretino e l'orvietano Piero di Puccio. Dopo la sconfitta subita da parte di Firenze fu Benozzo Gozzoli a completare la galleria settentrionale tra il 1467 ed il 1484. Le opere di pittura a fresco delle pareti continuarono nei due secoli successivi. Per un approfondimento vedi gli scritti di Lina Bolzoni in BARACCHINI CASTELNUOVO 1996.

<sup>4</sup> Cfr. ALBERTI, PARIBENI 2012.



della copertura in piombo. Dopo il distacco degli affreschi, che condusse alla scoperta delle sottostanti sinopie, vennero successivamente ricostruite le coperture ad opera di Piero Sampaolesi.

fig. 1 – Pisa. Camposanto. Vista assonometrica dalla nuvola di punti del rilievo della piazza dei Miracoli (elaborazione grafica degli autori).

## 2. Il progetto di documentazione di piazza dei Miracoli

La piazza dei Miracoli è indiscutibilmente uno dei principali complessi monumentali italiani, le cui architetture hanno attirato numerose ricerche da parte di storici ed architetti. Per le stesse ragioni di interesse scientifico, quella che era la Facoltà di Architettura (oggi Dipartimento di Architettura, DiDA) dell'Università degli studi di Firenze ha iniziato un rapporto di collaborazione con l'Opera Primaziale Pisana<sup>5</sup> per sperimentare le innovative metodologie di rilievo digitale *laser scanner* nel 2002.<sup>6</sup> Il progetto ha permesso di muovere i primi passi verso la definizione di protocolli per l'acquisizione e la gestione del dato proveniente da strumentazioni TLS (*terrestrial laser scanner*) applicato a casi studio dall'alto valore patrimoniale,<sup>7</sup> che richiedono di archiviare notevoli quantità di informazioni riguardanti la caratterizzazione morfologica, materica, di natura diagnostica, per evidenti ragioni di conservazione e conoscenza tecnica del monumento stesso.

Il progetto ha consentito negli anni la realizzazione di un denso archivio di dati digitali con la ricostruzione di nuvole di punti tridimensionali che descrivono alla scala architettonica i volumi esterni dei principali monumenti della piazza, con focus specifici per il Battistero,<sup>8</sup> il Duomo<sup>9</sup>

<sup>5</sup> Nell'aprile 2002 ha avuto inizio la convenzione di ricerca che ha visto impegnato un gruppo di ricerca del Dipartimento di Progettazione dell'Architettura, Facoltà di Architettura, Università degli studi di Firenze, coordinato dal prof. Marco Bini (gruppo composto da Stefano Bertocci, Paola Puma, Giorgio Verdiani, Francesco Tioli, Mauro Giannini e Giovanni Pancani) e il laboratorio DIAPReM dell'Università di Ferrara, diretto da Marcello Balzani.

<sup>6</sup> Per approfondire lo storico delle operazioni condotte nel 2002 e per una cronistoria dei rilievi architettonico-digitali vedi PANCANI 2016.

<sup>7</sup> Lo studio dei monumenti attraverso queste metodologie era agli albori nei primi anni 2000, come è possibile vedere confrontando i risultati delle prime sperimentazioni sul rilievo *laser scanner* del Colosseo, vedi BALZANI *et al.* 1999.

<sup>8</sup> I lavori di documentazione al battistero, dopo una prima campagna nel 2002, sono continuati successivamente in diverse ulteriori e più approfondite campagne di acquisizione.

<sup>9</sup> Per i lavori del Duomo sono state condotte specifiche campagne di acquisizione TLS nel transetto per supportare il cantiere di restauro, oltre che un importante lavoro sulla

ed il Camposanto di cui approfondiremo in questa sede le metodologie applicate in relazione ai problemi/esigenze poste dalla committenza (fig. 1).

### 3. Il progetto di rilievo del Camposanto

Il progetto di rilievo architettonico digitale del Camposanto nasce, prima che per gli evidenti interessi scientifici del gruppo di ricerca, dall'esigenza degli uffici tecnici dell'Opera Primaziale di poter utilizzare una solida ed affidabile banca dati di documentazione per la corretta valutazione e progettazione, anche economica, degli interventi di restauro da operare sulle superfici del complesso monumentale. Il continuo rapporto che l'Opera ha nel tempo mantenuto con i principali enti di ricerca,<sup>10</sup> ha reso spontaneo il dialogo per l'aggiornamento tecnologico della documentazione utile al cantiere di restauro.

Per questo motivo fin dal 2018 è stato proposto un progetto che prevede la realizzazione di un archivio digitale che contiene accurati dati morfologici e colorimetrici, integrando le più recenti tecnologie di acquisizione dati ed approfonditi protocolli metodologici per la validazione dell'affidabilità delle banche dati. È in un certo senso doveroso ricordare gli immensi progressi strumentali di cui il campo del rilievo architettonico ha potuto beneficiare particolarmente nelle ultime due decadi, ed in particolar modo le maggiori potenzialità di conseguenza ottenute nella rappresentazione delle architetture, specialmente di alto valore patrimoniale. La possibilità di creare e gestire *database* di informazioni morfologiche complesse, che descrivono accuratamente nel dettaglio le caratterizzazioni materiche delle superfici e restituiscono un'immagine affidabile della disposizione degli elementi architettonici e costruttivi, ma consentono anche la navigazione e l'indagine in tempo reale ed ad alta definizione degli elementi decorativi, non è solo un'innovazione tecnica: il corretto utilizzo infatti di tali informazioni infatti viene tradotto dal disegnatore nella possibilità di rappresentare non solo un'architettura più accurata, ma dal poter analizzare, solo per citare alcune potenzialità, la composizione architettonica, l'evoluzione delle interfacce stratigrafiche, fino alla realizzazione del dettaglio decorativo. Oltre che come una base scientifica per l'analisi e la diagnostica, il rilievo digitale, sia *laser scanner* che fotogrammetrico, consente di archiviare dati importantissimi per la memoria del patrimonio, ovvero grazie alla ricostruzione di una copia digitale accurata dell'architettura, è possibile creare una fotografia nel tempo dello stato di conservazione del monumento che consenta qualora ce ne fosse la necessità di interrogare continuamente le forme e le caratteristiche superficiali per estrarne dati o disegni tecnici: pensando all'evento catastrofico che si ebbe con le coperture del camposanto, la possibilità di riprodurre digitalmente una copia delle coperture avrebbe per lo meno favorito la ricostruzione degli elementi con forme e tecniche costruttive vicine all'originale; parallelamente avrebbe consentito di ricordare le forme di elementi decorativi o scultorei andati purtroppo persi a seguito

documentazione fotografica e sulla fotomodellazione del pulpito di Pisano, vedi PANCANI BIGONGIARI 2018.

<sup>10</sup> PANCANI 2016.

del crollo e dell'incendio. Non sono stati considerati in questa sede gli sviluppi legati alle tematiche dei gemelli digitali, che riproducendo non solo le forme ma anche attraverso numerosi sensori, altre caratteristiche come le vibrazioni, le temperature ecc. nel tempo vanno a costruire una copia digitale che riproduce fedelmente i comportamenti degli edifici, consentendo la costruzione di modelli parametrici che possono mostrare numerosi scenari di rischio nel tempo tali da prevenire o suggerire interventi volti al consolidamento strutturale o comunque alla conservazione delle opere d'arte.<sup>11</sup>

In questo modo il Camposanto è divenuto un vero e proprio campo di sperimentazione,<sup>12</sup> dove, nonostante ormai fossero ben definite le procedure di acquisizione e restituzione del dato proveniente da rilievo *range based*,<sup>13</sup> vi è stata occasione per testare l'applicazione di nuovi sistemi di acquisizione e metodologie per l'integrazione tra banche dati dal complesso sviluppo morfologico. Per questo motivo le missioni di acquisizione dati, benché siano state programmate con la necessità di restituire un dato grafico adeguato alle richieste in termini di affidabilità della committenza, hanno reso possibile nel tempo di integrare dati acquisiti con tecnologie sempre più all'avanguardia, utilizzando sia hardware che software sempre più performanti e capaci di gestire banche dati complesse, non solo in termini geometrici, ma anche banalmente di dimensione di archiviazione.

#### 4. Un *database* implementabile: le campagne di rilievo digitale

Dopo la doverosa introduzione al progetto, entriamo nello specifico per descrivere come è stato progettato il rilievo digitale del Camposanto di Pisa, quali erano le sfide e le esigenze richieste alla documentazione digitale, e come sono stati risolti le problematiche tecniche per la corretta ricostruzione della morfologia del monumento<sup>14</sup>. I primi dati relativi al camposanto erano stati ripresi già nella realizzazione dell'archivio tridimensionale del Battistero, in quanto le acquisizioni *range based* effettuate con *laser scanner* terrestre fisso, compiendo misurazioni massive a 360° con elevata risoluzione, hanno consentito la ricostruzione seppur non ad elevata densità delle superfici esterne del Camposanto<sup>15</sup>.

Ma è dal 2017 che grazie alle esigenze dell'Opera Primaziale prende avvio un vero e proprio progetto di documentazione integrale del Camposanto.<sup>16</sup> L'importanza del monumento ha da subito reso indispensabile un'accurata pianificazione delle attività di rilievo e delle fasi di post produzione, con la consapevolezza che fosse lo strumento necessario per ottenere dati geometrici ed elaborati grafici di altissima affidabilità metrica,

<sup>11</sup> Per uno specifico approfondimento dei gemelli digitali vedi BALZANI 2022.

<sup>12</sup> Similmente a quanto era accaduto con il progetto del Battistero, che ha accompagnato la definizione di protocolli metodologici per la restituzione grafica del dato *laser scanner* e la gestione di superfici curve per diversi anni.

<sup>13</sup> Si veda PANCANI 2016.

<sup>14</sup> Per un approfondimento metodologico vedi BERTOCCI 2014.

<sup>15</sup> Per avere un panorama delle attività di rilievo digitale vedi BERTOCCI, PARRINELLO 2015.

<sup>16</sup> Il progetto inizia grazie ad una convenzione con Sisma srl., *spin-off* dell'Università di Firenze a cui sono stati commissionati i lavori di rilievo digitale della pavimentazione.



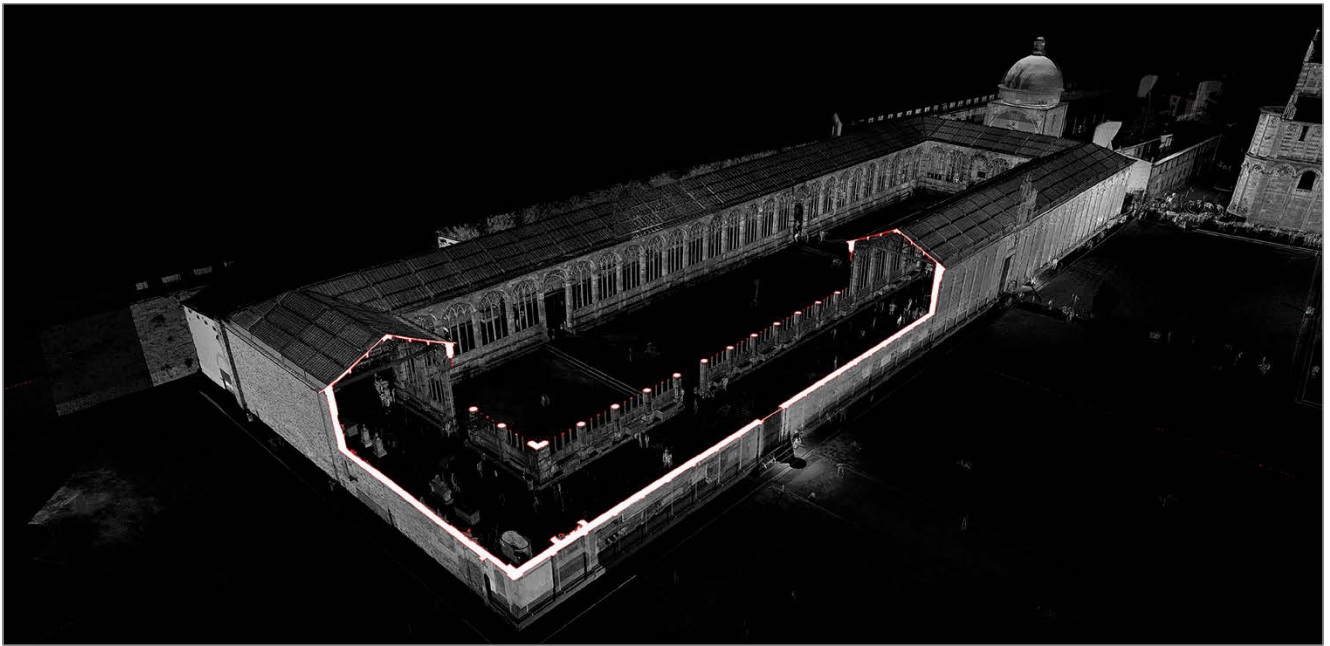


fig. 2 – Pisa. Camposanto. Rilievo *laser scanner*. Nuvola di punti del Camposanto in una sezione su tre assi in vista prospettica (elaborazione grafica degli autori).

congiuntamente all'elevata capacità descrittiva degli ortofotopiani. È stato quindi utilizzato un approccio metodologico volto all'integrazione di più sistemi di acquisizione, sia per i dati di carattere metrico-morfologico, sia per quelli di carattere fotografico.

#### 4.1 *Il rilievo tls del camposanto*

Il rilievo laser scanner del Camposanto ha seguito accurate metodologie di acquisizione e gestione di tutte le fasi del processo di rilievo digitale, che da diversi anni sono argomento prioritario nella ricerca affrontata dal gruppo di studio.<sup>17</sup> Nella progettazione del rilievo si è necessariamente tenuto conto sia delle elevate caratteristiche decorative e pittoriche presenti all'interno del monumento, che della necessità di ottenere nuvole di punti geometricamente affidabili alla scala di riduzione almeno 1:20.<sup>18</sup> Un tale approfondimento morfologico è stato possibile utilizzando strumentazioni di ultima generazione che fornisca dati di misurazione precisi alla scala del millimetro;<sup>19</sup> queste caratteristiche, come evidenziato dalla letteratura non sono sufficienti a garantire un modello complessivamente affidabile,<sup>20</sup> ma è necessario verificare e controllare accuratamente la fase di rototraslazione delle postazioni *laser scanner*, che ha come fine ultimo la realizzazione di una nuvola di punti unificata complessiva. La registrazione delle scansioni è stata supportata dall'integrazione di una poligonale topografica, che è stata utilizzata per verificare punti omologhi architettonici distribuiti all'interno del complesso ed accuratamente acquisiti sul campo attraverso

<sup>17</sup> Vedi per una prima metodologia la tesi di dottorato di Pancani 2005 e per un perfezionamento delle tecniche di acquisizione PANCANI 2015.

<sup>18</sup> Considerando che, come vedremo più avanti, la restituzione grafica delle pavimentazioni di tutte le gallerie è stata richiesta a tale scala.

<sup>19</sup> Tale riferimento numerico è da riferirsi alla singola postazione di scansione che, come è noto, viene certificata da accurati test in laboratorio dello strumento durante il processo di calibrazione. Nel caso del rilievo del Camposanto è stato utilizzato un interferometro Z+F 5010X che misura con accuratezza inferiore ad 1mm su distanze di 25 m.

<sup>20</sup> Confronta BIGONGIARI 2020.

l'utilizzo di una stazione totale e riscontrabili nel modello di punti *laser scanner*. La certificazione del processo di registrazione, effettuata secondo protocolli affinati nel tempo che prevedono un accurato sistema nella scelta dei legami (*cloud-costraint*) da realizzare tra le nuvole, nella lettura e validazione dei valori di disallineamento ottenuti e nella verifica finale dei fili di sezione da eseguire direttamente sulle nuvole di punti registrate, ha consentito di certificare la sua corretta esecuzione e quindi l'affidabilità complessiva del modello, con disallineamenti inferiori ad 1 cm<sup>21</sup>.

Sono state realizzate 153 scansioni progettate in modo tale da consentire la descrizione dell'architettura con una maglia di punti che avesse una spaziatura inferiore al mezzo centimetro, e da consentire la registrazione dei dati riproducendo poligoni chiusi in modo tale da consentire l'eventuale redistribuzione degli errori angolari causati nel processo di roto-traslazione tra le varie scansioni, abbattendo così l'errore complessivo. La nuvola di punti così generata è andata a costituire l'archivio morfologico del Camposanto, sulla cui affidabilità geometrica si sono basate tutte le successive elaborazioni (*fig. 2*).

Nel 2020 è iniziata una sperimentazione sul rilievo *mobile mapping* del Camposanto, i cui risultati devono ancora essere approfonditi, che ha portato alla ricostruzione di nuvole di punti tridimensionali che benché realizzate in tempistiche rapide, non consentono la lettura di dettaglio delle caratteristiche architettoniche degli elementi, ma una rapida ricostruzione dei volumi e delle rappresentazioni a scala superiore ad 1:200 (*fig. 8*).

#### 4.2 Il rilievo fotogrammetrico

Come è noto se grazie alle strumentazioni *range based* è possibile acquisire con parametri noti le forme delle superfici architettoniche, per poterle caratterizzare con texture è necessario ricorrere alle metodologie *image based*, che oggi prevedono l'utilizzo di acquisizioni SfM (*structure from motion*)<sup>22</sup>. Per il Camposanto di Pisa la realizzazioni di elaborati grafici bidimensionali che potessero consentire la mappatura delle indagini diagnostiche da parte dei restauratori dell'Opera Primaziale era di fondamentale importanza, e, per garantire stato una scientificità delle operazioni di rilievo e restituzione, non è stato ritenuto congruo utilizzare il dato fotografico acquisito dallo scanner durante le operazioni di scansioni,<sup>23</sup> ma sono stati utilizzati processi accuratamente progettati a seconda del livello di dettaglio richiesto.<sup>24</sup> Il rilievo fotogrammetrico è stato condotto complessivamente ad una scala architettonica 1:50 per tutte le superfici verticali del complesso (*fig. 4*), con approfondimenti alla scala 1:20 per tutta la pavimentazione in lastre lapidee (*fig. 7*).<sup>25</sup> Il

*fig. 3* – Pisa. Camposanto. Pianta.

Vi sono rappresentate le lastre tombali delle sepolture, le due cappelle che affacciano sul lato nord (cappella Ammannati a sx, cappella Aulla a dx) e la cappella Dal Pozzo che si affaccia sul lato est (elaborazione grafica degli autori).

*fig. 4* – Pisa. Camposanto. In alto, prospetto della Galleria sud, lato verso la piazza; in basso appoggiati sulla seduta si notino i sarcofagi, mentre più in alto i grandiosi affreschi fra cui il giudizio universale ed il trionfo della morte di Buffalmacco. Le due porte di accesso al Camposanto e in fondo a sx le tracce della porta richiusa di cui sono visibile le tracce anche nel prospetto esterno.

Sotto il prospetto interno delle quadrifore verso il prato del chiostro (elaborazione grafica degli autori).

*fig. 5* – Pisa. Camposanto. Prospetto delle quadrifore della Galleria sud, quotato e rappresentato al filo di ferro (elaborazione grafica degli autori).

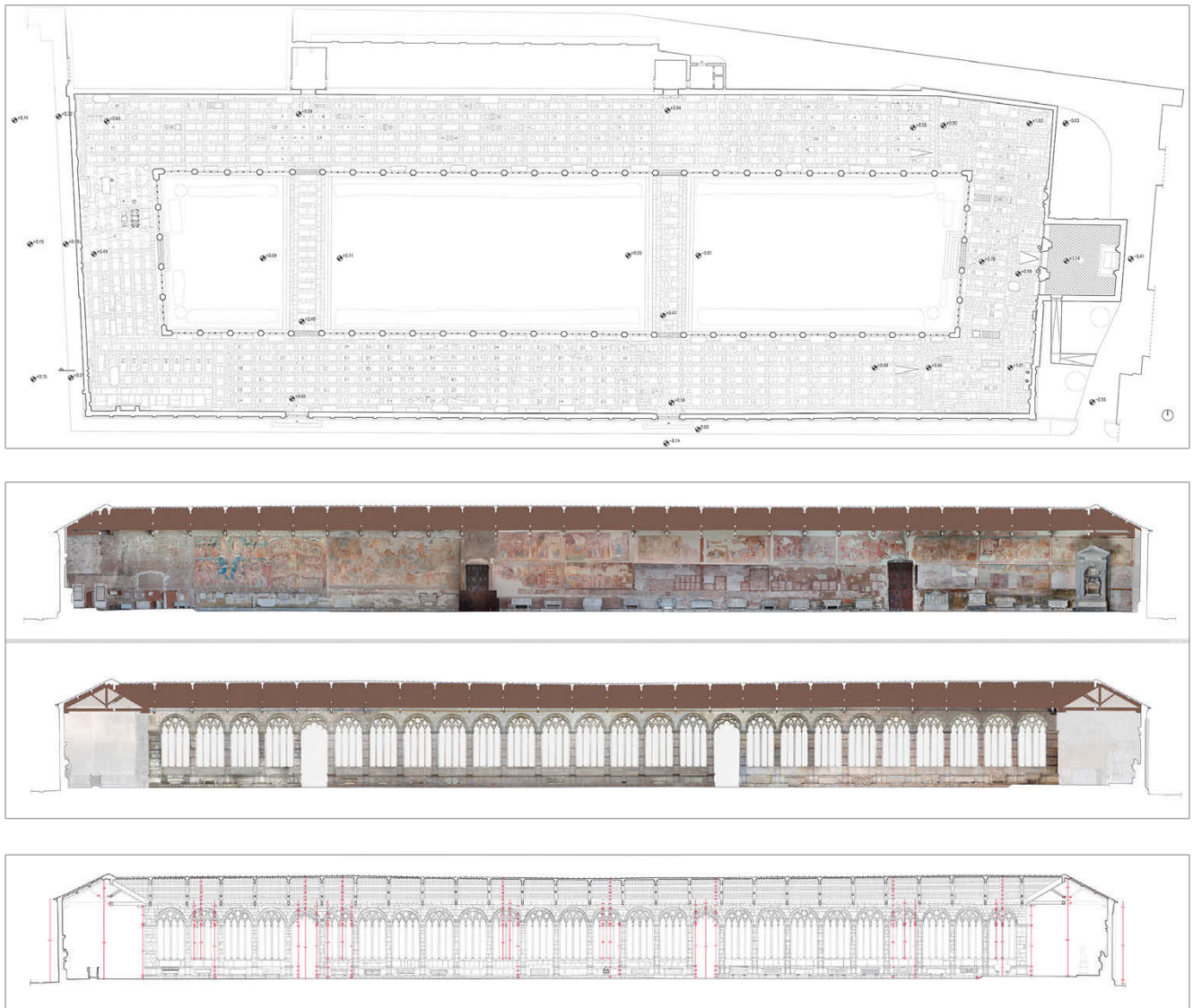
<sup>21</sup> Per un panorama sull'affidabilità del dato laser vedi RINAUDO 2003.

<sup>22</sup> Confronta BALLABENI *et al.* 2012.

<sup>23</sup> Il dato fotografico acquisito dallo scanner non fornisce una vera e propria texture fotografica ma va ad associare ai punti rilevati dalla scansione un valore RGB sulla base dell'omologia tra acquisizione sferica e dato *laser scanner*.

<sup>24</sup> Per una sintesi sulla certificazione del processo di rilievo fotogrammetrico vedi PANCANI, BIGONGIARI 2010.

<sup>25</sup> Tuttavia è necessario precisare che per ottenere questo standard di definizione alle varie scale, senza perdere qualità, è necessario che le immagini dei fotopiani abbiano una risoluzione



progetto di rilievo fotogrammetrico così pensato e realizzato a partire dal 2018, è stato successivamente implementato con approfondimenti localizzati, che hanno previsto una nuova fase di scansione *laser scanner* e rilievo fotogrammetrico di dettaglio, a seconda delle esigenze del cantiere di restauro in corso d'opera: dal 2019 sono stati integrati infatti il rilievo dei paramenti murari esterni lato est; il rilievo del tabernacolo posto al di sopra di una delle porte del lato esterno sud, verso la piazza (fig. 6); il rilievo dei loggiati interni delle gallerie; oggi sono in fase di esecuzione i rilievi delle pareti affrescati.

Le campagne di acquisizione fotografiche sono state accuratamente progettate con l'intento di perfezionare i protocolli metodologici per la realizzazione di accurati modelli tridimensionali ottenuti dai software di fotogrammetria tridimensionale. Se dal punto di vista dell'acquisizione del dato fotografico non ci sono significative evoluzioni nei processi e nelle metodologie, se non legate all'evoluzione tecnologica hardware, non si può dire lo stesso dei software, che stanno avendo invece una fortissima innovazione, e consentono oggi l'integrazione tra nuvole di punti da dato

fotogrammetrico e *laser scanner*<sup>26</sup>. Nel rilievo del Camposanto di Pisa si possono osservare l'evoluzione delle metodologie di restituzione grafica dei modelli tridimensionali, sempre cercando di redigere protocolli di gestione e controllo sull'affidabilità dei dati fotografici, in modo da rispettare i parametri di errore delle varie scale di restituzione. Se i processi utilizzati per la pavimentazione del camposanto hanno richiesto l'integrazione di più software per la corretta generazione del modello *mesh* e per l'estrazione di fotopiani ad alta risoluzione, i più recenti modelli, come il tabernacolo esterno hanno previsto l'utilizzo integrato di nuvole strutturate *range based* e nuvole fotogrammetriche, consentendo la diretta messa in scala del modello, e una maggiore accuratezza nella realizzazione della *mesh*. Gli ultimi modelli interni alle gallerie stanno integrando l'utilizzo di droni integrando i dati da terra e le acquisizioni *laser scanner* per mantenere in tutta la verticalità delle superfici un angolo di ripresa ortogonale.

Per soddisfare gli aspetti qualitativi relativi alla rappresentazione fotografica sono state realizzate immagini che fossero in grado di raccogliere le informazioni ideone per le elaborazioni di fotogrammetria piana ma anche per le elaborazioni 3D (*mesh model*). Si è cercata una sequenza di inquadrature che non fosse eccessiva nel numero di immagini da elaborare attraverso programmi di fotogrammetria 2D, ma comunque sufficienti ad elaborare anche un modello 3D (*mesh model*) di elevata qualità, in grado di offrire ulteriori informazioni tridimensionali relative alla geometria e alla spazialità dei particolari architettonici. Il rilievo fotogrammetrico è stato referenziato tramite il rilievo *laser scanner*, a sua volta appoggiato sulla poligonale topografica di cui abbiamo trattato in precedenza.

Sono state preventivamente equalizzate tutte le immagini fotografiche, effettuando le correzioni necessarie per l'esposizione delle immagini, per la temperatura di colore e per gli altri parametri necessari a renderle quanto più omogenee possibile. Le immagini realizzate sono state pre-processate con il fine di limitare gli eventuali aggiustamenti successivi alle elaborazioni 2D e 3D (*mesh model*). Per la restituzione con fotogrammetria piana, si è proceduto secondo una metodologia ormai largamente consolidata, basata sul raddrizzamento, la calibrazione e la mosaicatura delle immagini fotografiche, sull'immagine *raster (ortho-image)*, ottenuta dalla proiezione in vera grandezza della superficie da processare. Questo procedimento consente di ottenere elaborati di elevata qualità ed estremamente affidabili, grazie al controllo ed alla calibratura, che può essere condotta sia con semplici punti di controllo, sia utilizzando la digitalizzazione al filo di ferro delle superfici da foto-raddrizzare (figg. 3-5).

### 4.3 Il modello parametrico

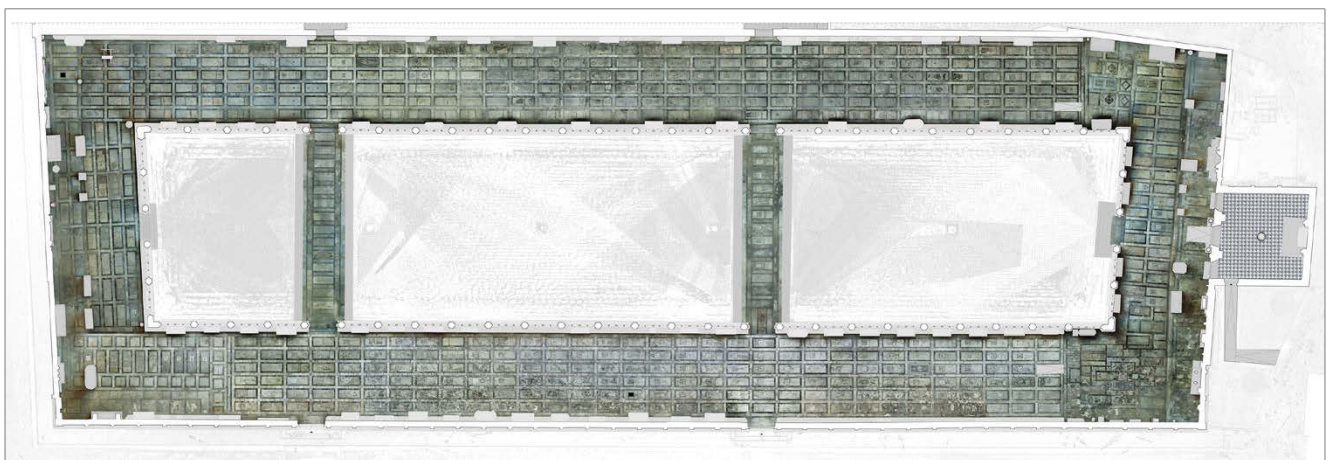
La ricostruzione delle nuvole di punti *laser scanner* e fotogrammetriche ha consentito la realizzazione di una banca dati morfologica in grado di descrivere e conservare la memoria dell'architettura monumentale in tutti i suoi punti di interesse. L'elevato livello descrittivo morfologico delle nuvole di punti presenta comunque al giorno d'oggi elevati margini di incertezza ed errori digitali intrinseci nei metodi di acquisizione che non

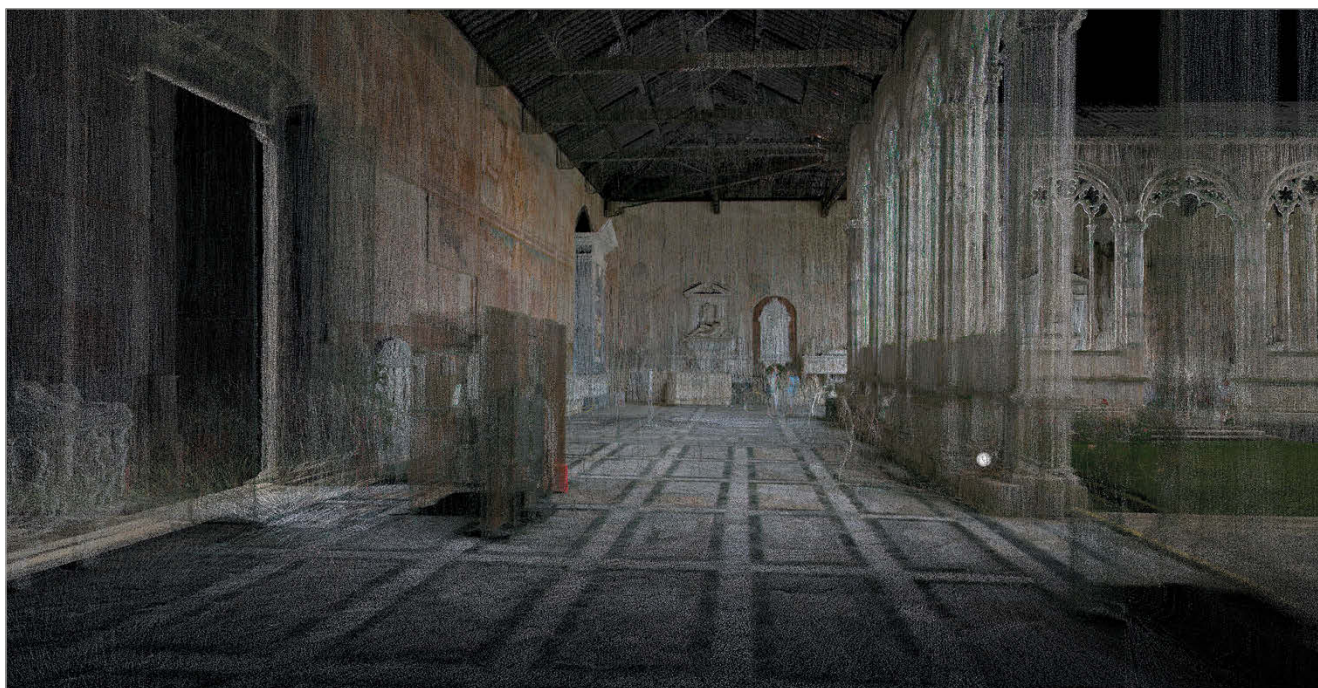
<sup>26</sup> Per alcuni approfondimenti sulle possibilità di ricostruzione del dato fotografico vedi GAIANI, APOLLONIO 2015.



*fig. 6* – Pisa. Camposanto. Fotopiano del Baldacchino dell'edicola che posta sopra la porta d'ingresso ottenuto con fotomodellazione SfM (elaborazione grafica degli autori).

*fig. 7* – Pisa. Camposanto. Pianta con il fotopiano di tutte le lastre tombali realizzato per una rappresentazione in scala 1:20 (elaborazione grafica degli autori).





*fig. 8* – Pisa. Camposanto. Nuvola di punti ricavata dal rilievo sperimentale effettuato con *laser scanner* mobile (Leica BLK2GO). (elaborazione grafica degli autori).

consentono di utilizzarli direttamente nella restituzione grafica architettonica, se non attraverso sistemi di disegno CAD manuale, che richiede l'intervento dell'operatore nella sua totale realizzazione. Allo stesso tempo le nuvole di punti forniscono un dato puramente spaziale che non riesce a descrivere le caratteristiche intrinseche dell'architettura, andando ad indagare la sola, seppur con elevato dettaglio, pelle esterna delle superfici, e non consentendo ancora il riconoscimento automatico dei differenti materiali. Ai fini del processo edilizio questo limite comporta un intenso intervento dell'operatore che consenta di trasferire i dati attraverso la restituzione grafica, passando da un elaborato tridimensionale (gli archivi di rilievo) ad un dato bidimensionale articolato in numerosi disegni che descrivono tutto l'oggetto architettonico.

Gli sforzi della ricerca nel campo della rappresentazione negli ultimi anni sono andati verso la rappresentazione tridimensionale delle architetture attraverso *software* BIM, che consentono non solo la modellazione, ma anche la caratterizzazione delle superfici e dei volumi dell'architettura con l'inserimento di parametri informativi, utili nelle varie fasi del processo edilizio<sup>27</sup>. L'applicazione di questi processi all'edilizia storica si è rivelata non di diretta applicazione ed è nato un filone di ricerca volto alla realizzazione di protocolli legati alla realizzazione di modelli BIM legati al patrimonio architettonico HBIM. Il Camposanto di Pisa si aggiunge a quelle architetture su cui il nostro gruppo di ricerca ha portato avanti alcune sperimentazioni: le sue superfici sono infatti state prima di tutto classificate, per procedere alla modellazione parametrica di tutti gli elementi architettonici, dai solai, alle murature verticali, agli elementi di copertura, realizzando una base parametrica su cui andare ad inserire tutte le informazioni morfologiche, storiche, costruttive, diagnostiche acquisite durante le operazioni di rilievo architettonico (*fig. 9*).

<sup>27</sup> Vedi LO TURCO, NOVELLO 2013.

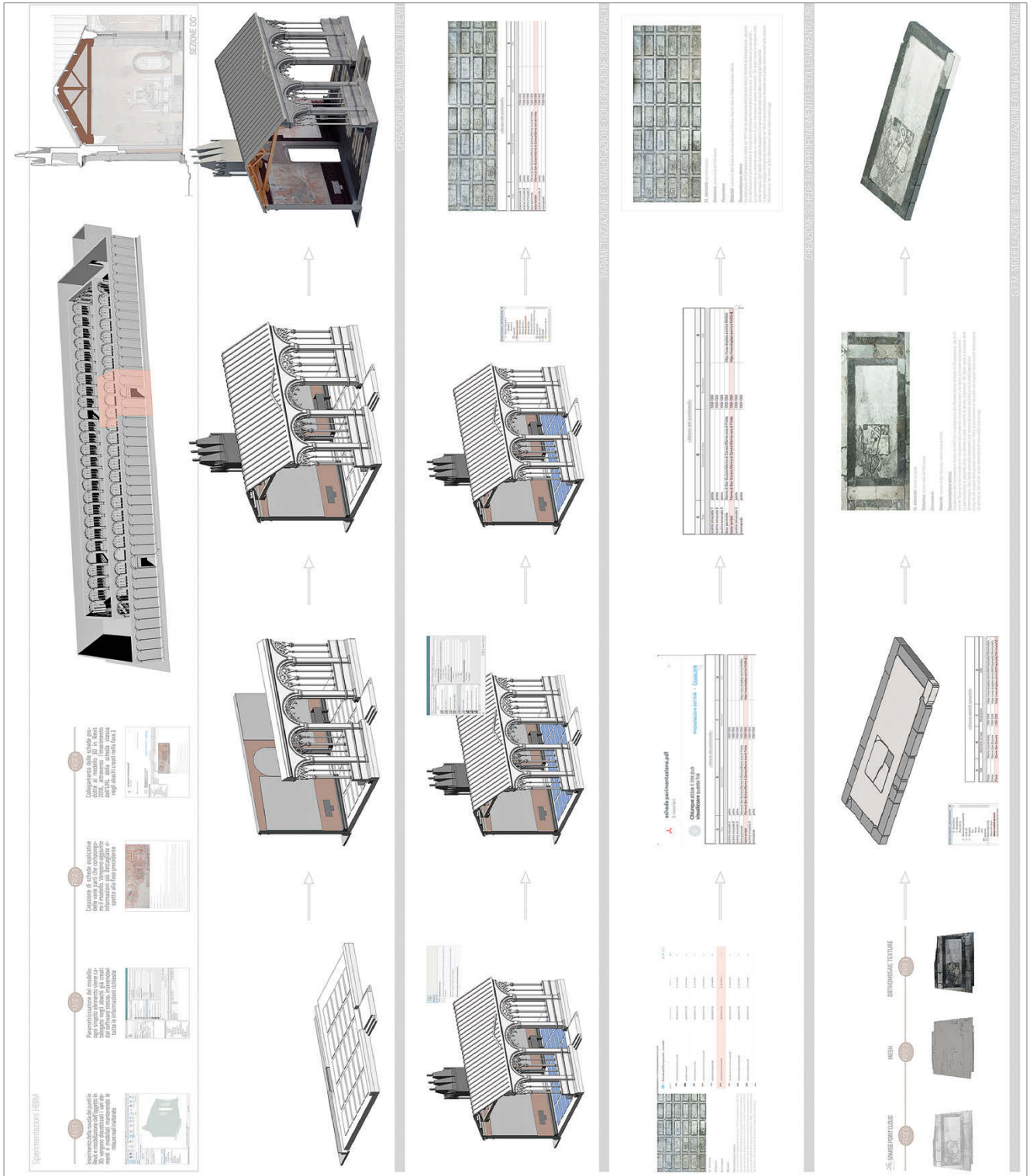


fig. 9 – Pisa. Camposanto. Immagini estratte dalla restituzione H-BIM eseguita in via sperimentale per una porzione del Camposanto (elaborazione grafica di Ilenia Caini e Giulia Ciampolini).

## 5. Conclusioni

Il rilievo tridimensionale del Camposanto di Pisa ha consentito la ricostruzione di un *database* digitale di informazioni morfologiche e colorimetriche in grado di descrivere accuratamente tutte le superfici dell'architettura; la restituzione grafica degli elaborati 2d ha permesso di ottenere disegni altamente di tutte le superfici architettoniche e dipinte, coadiuvando continuamente le operazioni di rilievo diagnostico dei restauratori del monumento. Le continue esigenze della committenza hanno consentito la continua sperimentazione di avanzati sistemi di rilievo architettonico, *range based*, con scanner fissi e mobili, ed *image based* con utilizzo di camere da terra e droni; parallelamente la ricostruzione di un modello BIM *based* propone un nuovo modello di gestione dei dati di rilievo volto alla interoperabilità e alla messa a sistema di tutte le informazioni legate al monumento. Le restituzioni grafiche, realizzate attraverso procedure di rilievo e disegno altamente affidabili hanno prodotto un insieme di elaborati che descrivono accuratamente gli elementi architettonici, aprendo a nuovi scenari di ricerca ed interpretazione sulla realizzazione delle fasi costruttive della fabbrica.



## Bibliografia

- Archeologia in Piazza dei Miracoli 2012 = *Archeologia in Piazza dei Miracoli. Gli scavi 2003-2009*, a cura di A. ALBERTI, E. PARIBENI, Pisa.
- ARGAN G.C., 1936, *L'architettura proto cristiana, preromanica e romanica*, Firenze.
- BALLABENI A., APOLLONIO F.I., GAIANI M., REMONDINO F., 2012, *Advances in image pre-processing to improve automated 3D reconstruction*, «International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences», XL-5/W4, pp. 315-323.
- BALZANI *et al.* 1999= BALZANI M., GAIANI M., SECCIA L., SANTOPUOLI N., *Una metodologia integrata per l'acquisizione e la restituzione di dati 3D e colorimetrici di elementi architettonici e apparati decorativi ai fini della loro conservazione. Il caso di elementi architettonici, decorativi e parti di fabbrica del Colosseo a Roma*, in *Gli strumenti di conoscenza per il progetto di restauro*, Atti del Convegno (settembre 1999), Valmontone, pp. 80-83.
- BARACCHINI C., CASTELNUOVO E., 1996, *Il Camposanto di Pisa*, Torino.
- BENASSI L., PIEROTTI P., 2001, *Deotisalvi – L'architetto pisano del secolo d'oro*, Pisa.
- BERTOCCI S., 2014, *The archaeological survey as a basic documentation for the conservation of the site of Masada*, in S. BERTOCCI, S. PARRINELLO, R. VIDAL (a cura di), *Masada Notebooks. Report of the research project*, Firenze, vol. II, pp. 55-78.
- BERTOCCI S., 2013, *Esperienze di documentazione e rilievo digitale di alcuni siti Patrimonio UNESCO: un importante contributo per i Piani di Gestione*, in 35° Convegno Internazionale dei Docenti della Rappresentazione: Patrimoni e siti UNESCO. Memoria, Misura e Armonia (Matera 2013), Roma, pp. 121-131.
- BERTOCCI S., PARRINELLO S., 2015, *Digital Survey and Documentation of the Archeological and Architectural sites. UNESCO World Heritage list*, Firenze.
- BERTOCCI S., PUMA P., 2015, *Experiences of documentation and digital survey of some UNESCO world heritage sites*, in *Contemporary problems of architecture and construction*, Firenze, pp. 679-684.
- BIGONGIARI M., 2020, *La cattedrale di Sasamón. Rilievo digitale e strutturale per la conservazione del Patrimonio*, Firenze.
- CARLI E., 1956, *La Piazza del Duomo di Pisa*, Roma.
- CALECA A., 1991, *La dotta mano, il Battistero di Pisa*, Bergamo.
- CERAVOLO R., CHIORINO M.A., NOVELLO G., ABBIATI G., ZANOTTI FRAGONARA L., 2015, *Reconciling geometry and dynamics: models for oval domes*, in *Proceedings of Domes in the world*, International Congress, 2 voll., Firenze, vol. I, pp. 61-73.
- CHIPELLINI NARI M., 1989, *Le sculture nel Battistero di Pisa. Temi e immagini del medioevo, i rilievi del deambulatorio*, Pisa.
- DOCCI M., MAESTRI D., 2010, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Bari.
- GAIANI M., APOLLONIO F.I., 2015, *Innovative approach to the digital documentation and rendering of the total appearance of fine drawings and its validation on Leonardo's Vitruvian Man*, «Journal Of Cultural Heritage», 16, pp. 805-812.
- LO TURCO M., NOVELLO G., 2013, *From real to virtual (and back): survey and design applied to BIM approach*, in *Mo.Di. Phy. Modeling from digital to physical* (Lecco 2013), Santarcangelo di Romagna, pp. 96-103.
- PANCANI G., 2005, *I Quartieri Estivi di Palazzo Pitti, gestione di una banca dati di rilievo integrato*, Tesi di dottorato di ricerca in Rilievo e rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, XVIII ciclo, relatore M. Bini, Università degli Studi di Firenze.
- PANCANI G., 2011, *Lo svolgimento in vera grandezza delle volte affrescate delle sale dei quartieri al piano terreno di Palazzo Pitti a Firenze*, in *Il Disegno delle trasformazioni*, Atti delle Giornate di Studio (Napoli 2011), Napoli.
- PANCANI G., 2014, *Il Battistero di Piazza dei Miracoli a Pisa, metodologie per la restituzione e la documentazione dei paramenti esterni*, in S. BERTOCCI, S. VAN RIEL (a cura di), *La cultura del restauro e della valorizzazione. Temi e problemi per un percorso internazionale di conoscenza*, Atti del 2° Convegno internazionale sulla documentazione, patrimonio architettonico e sulla tutela paesaggistica, Reuso (Firenze 2014), Firenze, vol. I, pp. 501-508.
- PANCANI G., 2015, *Il rilievo laser scanner della cattedrale di Sasamón*, in S. BERTOCCI, G. MINUTOLI, S. MORA, G. PANCANI (a cura di), *Complessi religiosi e sistemi difensivi sul Camino di Santiago de Compostela: Rilievi e analisi per la valorizzazione e il restauro della cattedrale di Santa Maria la Real a Sasamón*, Firenze, pp. 61-75.
- PANCANI G., 2016, *Piazza dei Miracoli a Pisa: il Battistero Metodologie di rappresentazione e documentazione digitale 3D*, Firenze.
- PANCANI G., 2017, *Rilievo delle lastre tombali del Camposanto Monumentale di Piazza dei Miracoli a Pisa*, «Restauro Archeologico», 25, 2, pp. 74-89.
- PANCANI G., BIGONGIARI M., 2020, *The Integrated Survey of the Pergamum by Nicola Pisano in the Cathedral of Pisa*, in H. KREMER, *Digital Cultural Heritage*, Springer.
- PARRINELLO S., PICCHIO F., 2013, *Dalla fotografia digitale al modello 3D dell'architettura storica*, «Disegnare con», 10, 12, pp. 1-14.
- REDI F., 1996, *Pisa, il Duomo e la Piazza*, Milano.
- RINAUDO F., 2003, *La tecnica laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche*, in F. CROSILLA, R. GALETTO (a cura di), *La tecnica del laser scanning: teoria e applicazioni*, Udine, pp. 134-136.
- SANPAOLESI P., 1974, *Il Duomo di Pisa e l'architettura romanica toscana delle origini*, Pisa.
- VERDIANI G., 2003, *Il Battistero di Pisa: rilievo e rappresentazione digitale tra ricerca e innovazione*, Tesi di dottorato di ricerca in Rilievo e rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, XV ciclo, relatore: M. Bini, Università degli Studi di Firenze.

## ARCHITETTURA MEDIEVALE

1. *La città medievale è la città dei frati? | Is the medieval town the city of the friars?*, a cura di Silvia Beltramo e Gianmario Guidarelli
2. *Architettura medievale: il Trecento. Modelli, tecniche, materiali*, a cura di Silvia Beltramo e Carlo Tosco
3. *I chiostri nell'area mediterranea tra XI e XIII secolo. Architettura, archeologia, arte*, a cura di Arianna Carannante e Fabio Linguanti

Il volume nasce dall'idea di riflettere sul ruolo del chiostro, spazio nodale della vita monastica: luogo di ascesi, rifugio, meditazione e ritiro. La progettazione degli spazi claustrali occupa un ruolo centrale nella produzione architettonica medievale. In parallelo all'istituzionalizzazione e diffusione degli Ordini religiosi, nel periodo compreso tra l'XI e il XIII secolo, si assiste all'elaborazione di differenti soluzioni progettuali. L'architettura dei chiostri abbaziali, canonicali, conventuali risponde alle esigenze delle comunità che li abitano e le variazioni architettoniche sono l'esito dell'incontro tra "modelli d'importazione" e pratiche costruttive autoctone. Dalla necessità di esplorare con maggiore attenzione lo spazio mediterraneo nel medioevo, nonché di porre a confronto gli sviluppi delle ricerche nei diversi paesi, ha preso forma l'idea di questo volume multidisciplinare, comprendente circa trenta contributi. Si tratta del primo passo di un ampio lavoro che pone al centro l'isola di Lipari, con lo scopo di indagare la complessità dei fenomeni architettonici, artistici e archeologici nel mediterraneo medievale.

**Arianna Carannante**, architetto (2011) e PhD (2021) in Storia dell'Architettura presso il Dipartimento di Storia, Disegno e Restauro dell'Architettura della Sapienza Università degli Studi di Roma e in Storia dell'Arte presso la Faculté des Lettres de Sorbonne Université, Centre André Chastel. Attualmente è Visiting Associate Research Scholar all'Italian Academy della Columbia University (USA). È stata, inoltre, assegnista di ricerca presso Sapienza Università di Roma (2022-2023) e il Politecnico di Torino (2020-2022). I suoi interessi di ricerca vertono sull'architettura romanica in Puglia, sull'architettura di committenza angioina in Italia meridionale e sull'edilizia pubblica in Italia centrale nel Medioevo. Tra le sue pubblicazioni recenti il volume: *La cattedrale di Lucera e l'architettura angioina del primo Trecento*, Roma, Viella 2023.

**Fabio Linguanti**, architetto (2016) e PhD (2020) in Storia dell'Architettura presso l'Università degli studi di Palermo e in Archéologie du Bâti presso il LA3M (UMR 7298, AMU-CNRS). È assegnista di ricerca presso il Politecnico di Torino e membre associé al LA3M. La sua ricerca volge in particolare sui periodi normanno e svevo e alle tecniche costruttive storiche. Tra le sue ultime pubblicazioni: *Le cripte nelle cattedrali siciliane di Ruggero I d'Altavilla. Origini, ruolo, e risposnde architettoniche*, «Studi e Ricerche di Storia dell'Architettura», 11 (2022), pp. 90-103; *Le recenti acquisizioni sulla cattedrale di Troina e lo schema a navata unica nella Contea normanna di Sicilia: un modello per la conquista?*, «Abside», 4 (2022), pp. 95-110.

**Contributi di:** Nicodemo Abate, Chiara Audizi, Roberto Barni, Xavier Barral i Altet, Tancredi Bella, Silvia Beltramo, Matteo Bigongiari, Sara Bini, Simone Caldana, Italia Caradonna, Arianna Carannante, Valeria Carta, Alessandra Cattaneo, Renzo Chioveli, Elvira D'Amico, Teodoro De Giorgio, Sylvain Demarthe, Alessia Frisetti, Emanuele Gallotta, Francesco Gandolfo, Maria Teresa Gigliozzi, Fabrizio Giuffrè, Gianmario Guidarelli, Heike Hansen, Andreas Hartmann-Virnich, Fabrice Henrion, Carlo Inglese, Yoshie Kojima, Fabio Linguanti, Dino Lombardo, Federico Marazzi, Ferdinando Maurici, Andrea Pala, Giulia Maria Palma, Giovanni Pancani, Alessandra Panicco, Julia Perratore, Olivier Poisson, Renata Prescia, Marco Pretelli, Vania Rocchi, Maria Cristina Rossi, Christian Sapin, Rosario Scaduto, Rosario Vilardo.

€ 80,00

ISSN 2785-4663  
e-ISSN 2785-4566  
ISBN 978-88-9285-284-6  
e-ISSN 978-88-9285-285-3



ARCHIMED-3

ARCHI  
MED

I chiostri nell'area mediterranea tra XI e XIII secolo.  
Architettura, archeologia, arte



## I chiostri nell'area mediterranea tra XI e XIII secolo.

### Architettura, archeologia, arte

a cura di Arianna Carannante e Fabio Linguanti



Lipari. Complesso monastico di San Bartolomeo. Chiostro, ambulacro sud (foto di Fabio Linguanti).