



Sofia Brizzi è nata a Sansepolcro (AR) il 14 Marzo 1994. Ha conseguito con il massimo dei voti e lode la laurea magistrale in *Scienze e Materiali per la Conservazione e il Restauro* presso la Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali dell'Università degli Studi di Firenze, discutendo nell'A.A. 2019-2020 una tesi dal titolo: *"The conservation of detached wall paintings on fiberglass supports: the case study of the fresco Predica di San Giovanni Battista in the basilica of Santa Croce (Florence)"* (relatore: Cristiano Riminesi, correlatori: Barbara Salvadori, Marilena Ricci, Anna Medori, Andrea Arnetoli).

Dal 2021 ha frequentato il XXXVI ciclo del Dottorato di Ricerca in Architettura, progetto, conoscenza e salvaguardia del Patrimonio Culturale, curriculum di *Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente* presso l'Università degli Studi di Firenze. Dal 2021 partecipa e collabora a progetti Nazionali ed Internazionali all'interno del Laboratorio di Rilievo dell'Architettura del DIDA - Dipartimento di Architettura di Firenze e presso l'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC - CNR) di Firenze.

Dal 2021 al 2024 risulta titolare di tre assegni di ricerca presso il CNR - ISPC - Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale di Firenze.

Gli interessi scientifici si basano sullo sviluppo e applicazione di metodologie e prodotti per la caratterizzazione, conservazione e monitoraggio dei Beni Culturali, con particolare attenzione alla conoscenza del Patrimonio Architettonico, dal rilievo digitale alla definizione del quadro diagnostico mediante indagini di tipo non invasivo e debolmente invasivo impiegate per lo studio di opere antiche e contemporanee.

Durante il corso di Dottorato ha prodotto articoli pubblicati all'interno di riviste indicizzate, volumi scientifici e Atti di Convegni di interesse Nazionale ed Internazionale, per i quali ha inoltre partecipato come relatore sia in Italia che all'estero.

Università degli Studi di Firenze

Dipartimento di Architettura - DIDA

Dottorato di Ricerca in Architettura, progetto, conoscenza e salvaguardia del Patrimonio Culturale

Curriculum in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente

Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXXVI

Settore disciplinare ICAR-17

Coordinatore

Prof. Fabrizio Franco Vittorio **ARRIGONI**

Rilievo digitale multi-scala e integrazione dei dati VIS e IR per la conservazione preventiva delle pitture murali.

Il caso di studio del chiostro Verde nella basilica di Santa Maria Novella a Firenze.

Dottorando

Dott. ssa Sofia Brizzi

Tutor

Prof. Stefano **BERTOCCI**

Co-tutor

Cristiano **RIMINESI**

Referente del Curriculum

Prof. ssa Barbara **ATERINI**

Sofia Brizzi

Rilievo digitale multi-scala e integrazione dei dati VIS e IR per la conservazione preventiva delle pitture murali
il caso di studio del chiostro Verde nella basilica di Santa Maria Novella a Firenze.

Sofia Brizzi

Rilievo digitale multi-scala e integrazione dei dati VIS e IR per la conservazione preventiva delle pitture murali

Il caso di studio del chiostro Verde nella basilica di Santa Maria Novella a Firenze



Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXXVI

The conservation of cultural heritage requires in-depth documentation of art-historical, colorimetric, physical and morphological attributes. Today, digital survey techniques allow for extremely accurate 3D representation of objects and structures. These technologies are fundamental for the preventive conservation of wall paintings. The study proposed in this thesis focused on methods for the conservation of detached wall paintings on various mobile supports, generally consisting of fibreglass, Masonite and metal mesh with gypsum. The techniques of "stacco" and "strappo", historically used to prevent the loss of degraded paintings, were applied to the wall paintings of the Verde Cloister of Santa Maria Novella, in Florence. These frescoes show different types of degradation, so they were studied with non-invasive methods such as infrared thermography (IRT), Structure from Motion photogrammetry and 3D laser scanning at long and close range. These methods made it possible to quantify deformations and monitor the movement of supports. Furthermore, the integration of infrared thermographic data with digital visual surveys has produced 3D thermal point clouds (IRT-3D), useful for the documentation and conservation of Architectural Heritage. The multi-analytical approach aims to establish a conservation protocol for these frescoes and similar case studies, addressing the increasingly common deterioration problems observed in detached wall paintings.

In copertina:

Particolare VIS e IR de "Il Diluvio universale e la recessione delle acque" di Paolo Uccello | Sofia Brizzi©



Università degli Studi di Firenze

Dipartimento di Architettura - DIDA

Dottorato di Ricerca in Architettura, curriculum in *Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente* - ICAR 17

Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Architettura - DIDA
Dottorato di Ricerca in Architettura, curriculum in *Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente*

Tesi di Dottorato di Ricerca D.P.R. 11/7/1980 - Ciclo XXXVI

Coordinatore *Prof. Fabrizio Franco Vittorio ARRIGONI*

Rilievo digitale multi-scala e integrazione dei dati VIS e IR per la conservazione preventiva delle pitture murali

Il caso di studio del chiostro Verde nella basilica di Santa Maria Novella a Firenze

Settore disciplinare ICAR-17

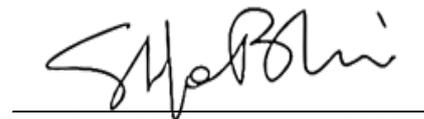
Dottorando

Dott. ssa Sofia BRIZZI



Tutore

Prof. Stefano BERTOCCI



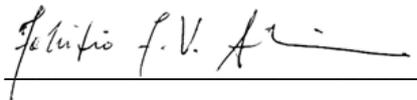
Co-tutore

Cristiano RIMINESI



Coordinatore

Prof. Fabrizio Franco Vittorio ARRIGONI



Anni 2021/2024

INDICE

INTRODUZIONE

11

CAPITOLO 1:

I DIPINTI MURALI STRAPPATI E STACCATI: STORIA, TECNICHE E PROBLEMATICHE CONSERVATIVE DEI SUPPORTI

16

1.1 Le varie tipologie di supporto dei dipinti murali strappati e staccati: dalla seconda metà del XIX secolo ad oggi. Storia e conoscenza materica.

20

1.1.1. Supporti in gesso e rete metallica

24

1.1.1.1. Problematiche conservative

24

1.1.2. Supporti in Masonite

25

1.1.2.1. Problematiche conservative

27

1.1.3. Supporti in vetroresina

29

1.1.3.1 Problematiche conservative

31

1.2 I sistemi di ancoraggio alla muratura

34

1.3 Individuazione degli obiettivi per una corretta conservazione

35

CAPITOLO 2:

IL CASO DI STUDIO DEL CHIOSTRO VERDE PRESSO LA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

40

2.1 Il ciclo di affreschi del chiostro Verde di Santa Maria Novella: storia e restauri

41

2.2. Problematiche conservative riscontrate in situ

52

2.3 Censimento e catalogazione: definizione di una scheda degli affreschi strappati/staccati del chiostro Verde per la gestione dei dati ed il loro utilizzo.

56

2.3.1. Struttura della scheda di catalogazione

57

2.4 Monitoraggio e gestione del rischio

58

CAPITOLO 3:

SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA DI RILIEVO DIGITALE INTEGRATO MULTI-SCALA E MULTI-SENSORE PER IL CONTROLLO DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DEI SUPPORTI DI DIPINTI MURALI STACCATI

66

3.1 I criteri della scelta metodologica

66

3.2 Rilievo laser scanner terrestre

68

3.3 Rilievo fotogrammetrico (tecnica <i>Structure from Motion</i>)	69
3.4 Rilievo con laser di precisione <i>close-range</i>	72
3.5 Rilievo termografico IR	74
3.6 Target come punti di controllo per il monitoraggio	75
3.7 Rilievo topografico	78
3.8 Monitoraggio temporale dei dipinti murali del chiostro Verde	79
3.8.1 Tempo 0 (Luglio 2021)	80
3.8.2 Tempo 1 (Marzo 2022)	82
3.8.3 Tempo 3 (Ottobre 2022)	83

CAPITOLO 4:

INTEGRAZIONE DEI DATI TERMOGRAFICI AL RILIEVO DIGITALE:

GENERAZIONE DI NUVOLE DI PUNTI 3D TERMICHE	86
4.1 Stato dell'arte per l'integrazione di modelli VIS e IR	86
4.2 Acquisizioni delle immagini termiche	90
4.3 Data processing	91
4.4 Workflow fotogrammetrico SfM	92
4.5 Co-registrazione delle nuvole di punti RGB e IR tramite GPCs e verifica dell'allineamento	94
4.6 Creazione di nuvole 3D geo-morfometriche e radiometriche (X, Y, Z, T)	94
4.7 Generazione orto-fotopiani termici	94
4.8 Analisi dei risultati	95

CAPITOLO 5:

RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO	102
5.1 Allineamento e integrazione dei modelli multi-temporali e multi-scala	102
5.1.1 Specifiche sulla creazione dei modelli digitali di elevazione (DEM), delle sezioni ortogonali ai dipinti murali e degli orto-mosaici	104
5.2 Risultati del rilievo <i>close-range</i> con laser di precisione ROMER Absolute Arm	109
5.3 Schedatura per il censimento degli affreschi del chiostro Verde nella basilica di Santa Maria Novella	113

5.4 Discussione delle metodologie e dei risultati	177
---	-----

CAPITOLO 6:

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEL PROTOCOLLO DEFINITO SU VARI CASI DI STUDIO: VERIFICA DELLE CRITICITÀ E DELLE POTENZIALITÀ DEL WORKFLOW PROPOSTO.

6.1 Le facciate rinascimentali di Palazzo Lenzi in piazza Ognissanti (Firenze)	188
6.2 Il monastero di Saint Miquel d'Escornalbou a Tarragona (Spagna)	192
6.3 Il castello-fortezza di Trogir (Croazia)	200
6.4 Discussione e analisi dei risultati	207

CONCLUSIONI	210
--------------------	-----

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	214
----------------------------------	-----

CREDITI	224
----------------	-----

ABSTRACT	229
-----------------	-----

INTRODUZIONE

La conservazione e valorizzazione del Patrimonio Culturale necessitano di un'approfondita documentazione sia in termini storico-artistici che per quanto concerne le caratteristiche fisiche di posizione, forma, colore e geometria. Le discipline del rilievo hanno affinato nel corso del tempo le tecniche di acquisizione dei dati al passo con lo sviluppo tecnologico permettendo di rilevare e rappresentare con notevole accuratezza oggetti tridimensionali come sculture e reperti archeologici, nonché elementi di grandi dimensioni quali strutture architettoniche fino ad elementi in scala millimetrica e sub-millimetrica. Le tecnologie di rilievo digitale e tutte le molteplici potenzialità che esse offrono le rendono tecniche imprescindibili ai fini della conservazione preventiva dei beni culturali. Da questi presupposti di documentazione a analisi tridimensionale del Patrimonio Culturale, lo studio si è mosso verso la ricerca e la sperimentazione di metodi in grado di soddisfare i criteri della conservazione programmata dei dipinti murali staccati applicati su varie tipologie di supporti mobili. La tecnica dello strappo e dello stacco dei dipinti murali dal loro supporto naturale ha rappresentato, fin dall'antichità, una delle principali metodologie per evitare la perdita del dipinto soggetto a processi di degrado di varia natura e per scoprire il disegno preparatorio dell'affresco.

La salvaguardia di questa particolare tipologia di bene culturale è, ad oggi, un tema di particolare interesse, dato l'avanzamento delle problematiche che interessano e derivano dai vari supporti nei quali gli affreschi sono stati collocati: problemi strutturali, deformazioni localizzate, fenomeni di umidità di risalita capillare e attacchi microbiologici sul tergo dei pannelli. Tutta questa serie di fenomeni provocano la formazione di cretti e *craquelures* sulla pellicola pittorica o comunque un suo indebolimento.

I supporti utilizzati per la ricollocazione del dipinto possono essere realizzati con materiali diversi e, sia che siano in Masonite, ibridi (canniccio misto a gesso con controtelai in legno), cemento miscelato con fibre di amianto, reti metalliche con gesso o vetroresina,

presentano, oggi giorno, uno stato di conservazione precario o comunque evidenti fenomeni di alterazione e/o degrado. Sulla base quindi della diversa costituzione materica e della diversa esposizione ai fattori ambientali (spesso si trovano collocati in ambienti confinati come chiese e musei o semi-confinati come chiostri e loggiati), i supporti presentano peculiarità e problematiche conservative differenti.

In tale contesto si inserisce il ciclo di affreschi presente nel chiostro Verde, nella basilica di Santa Maria Novella (Firenze), in cui è presente un grande ciclo di affreschi staccati e strappati, tra cui opere di Paolo Uccello, Dello Dello e altri pittori minori. Gli affreschi presentano una storia conservativa alquanto complessa, che li ha visti protagonisti di numerosi interventi sia di consolidamento-fermata del colore sia di stacco e ricollocamento su varie tipologie di supporti mobili. Staccati prima da Domenico Fiscali, poi definitivamente nel 1952 dall'Istituto Centrale del Restauro e trasportati nel 1954 da Leonetto Tintori su varie tipologie di supporti, gli affreschi presentano, ad oggi, diverse tipologie di degrado, tra cui deformazioni localizzate, perdita di funzionalità del sistema di ancoraggio alla muratura e sollevamento e perdita di colore.

Alla luce di tali problematiche è stato avviato uno studio interdisciplinare sugli affreschi e sul complesso architettonico nel quale essi sono inseriti, effettuato mediante metodi non invasivi e non distruttivi, tra cui la termografia infrarossa, il rilievo laser scanner 3D *long-range* e *close-range*, fotogrammetria *Structure from Motion* ed il rilievo topografico. Tali metodologie di rilievo multi-scala e multi-sensore risultano infatti metodi indispensabili per la costruzione dell'apparato critico dello stato di conservazione degli affreschi e per la ricerca di un adeguato protocollo conservativo. Mediante tali indagini è possibile quantificare le deformazioni subite dai supporti, acquisire le linee di controllo geometrico per il monitoraggio dei movimenti e delle deformazioni subite stagionalmente dai pannelli e verificare se tali movimenti hanno provocato o provocheranno la formazione di *craquelures*, cretti o

sollevamenti sulla pellicola pittorica.

L'interoperabilità dell'approccio multi-analitico proposto in questa tesi permetterà di effettuare un controllo periodico della planarità dei supporti in modo da valutarne i rischi, monitorarli e analizzare le cause e gli effetti che hanno prodotto sugli affreschi, con l'obiettivo finale di definire un adeguato protocollo conservativo adatto a questa tipologia di bene culturale, ma applicabile potenzialmente anche ad altri casi di studio che presentano problematiche simili. È stato infatti osservato come le stesse criticità conservative riscontrate presso il chiostro Verde siano analoghe ad altri contesti (nel solo centro storico di Firenze vi è un'ampia casistica di chiostri con affreschi strappati e/o staccati riportati su Masonite, vetroresina e supporti compositi, che presentano gravi problemi di degrado).

Per tali motivi è stato scelto di realizzare delle schede di catalogazione utili ad uniformare e organizzare tutti i dati oggi a disposizione sugli affreschi del chiostro Verde. Le schede di catalogazione consentiranno di creare un *database* con riferimenti comuni utili anche per effettuare analisi a posteriori, adottabili anche per altri chiostri fiorentini. Tutte le informazioni raccolte sono state catalogate secondo determinate categorie, con l'intento di organizzare in modo organico e univoco tutte le informazioni principali riguardanti gli affreschi, sia quelle di carattere generale, sia quelle emerse durante tale lavoro di tesi. Un ulteriore possibile *output* è quello di avvalersi di applicativi GIS (*Geographic Information System*) che permettono di ottenere rappresentazioni cartografiche con *layer* contenenti i dati di diversa natura visualizzati graficamente.

Nel corso del lavoro di tesi un ulteriore obiettivo è stato l'integrazione dei dati termografici nell'infrarosso al rilievo digitale nel visibile, che ha portato alla generazione di nuvole di punti 3D termiche (IRT-3D). Grazie a queste è stata resa possibile la creazione di nuvole 3D geo-morfometriche e radiometriche (X,Y,Z,T) applicabile non solo ai dipinti murali, ma anche ad altri casi di studio, trattati e discussi nel presente lavoro di tesi. Una documentazione completa è infatti

alla base di efficaci pratiche di conservazione, restauro e manutenzione del Patrimonio Architettonico. Al fine di analizzare e monitorare lo stato di conservazione di edifici storici, una combinazione di indagini multidisciplinari è fondamentale per comprendere il Patrimonio Culturale e le prestazioni di un edificio. In particolare la termografia a infrarossi (IRT) è un sistema di *imaging* senza contatto, non invasivo e non distruttivo che consente di effettuare valutazioni qualitative e quantitative della temperatura. Tuttavia, la bassa risoluzione spaziale intrinseca delle immagini termografiche ha portato a fondere dati termografici e geometrici per una documentazione 3D accurata del Patrimonio Architettonico. Il presente lavoro affronta l'ambito di questo campo emergente per comprendere l'applicazione dell'IRT e della fusione di dati 3D per il Patrimonio Architettonico. La crescente disponibilità di termocamere e i progressi dei *software* fotogrammetrici consentono di generare modelli termici per la diagnosi e la gestione olistica del Patrimonio Culturale. Inoltre, è evidente che i modelli IRT-3D offrono diverse opportunità per l'integrazione dei dati, tra cui la modellazione delle informazioni sugli edifici storici (H-BIM) e l'analisi temporale degli edifici storici. Gli sviluppi futuri sono necessari per trasformare i risultati di IRT-3D a sfide urgenti legate al clima, come l'efficienza energetica, il *retrofitting* e la valutazione del *comfort* termico.

Una volta adottate le tecnologie selezionate per la valutazione e il monitoraggio dello stato di conservazione degli affreschi staccati, verrà mostrata e discussa l'integrazione dei risultati del monitoraggio multi-sensore e ne verranno confrontati gli esiti sulle diverse tipologie di supporti esaminati. I risultati sono illustrati tramite elaborati tecnici 2D e 3D, in gran parte riportati nelle schede di catalogazione.

Infine, l'ultimo capitolo sarà interamente dedicato alla sperimentazione e valutazione delle prestazioni del protocollo definito su vari casi di studio per la verifica delle criticità e delle potenzialità del *workflow* proposto. Le esperienze applicative sono state condotte durante

il percorso di Dottorato e finalizzate ad indagare gli aspetti morfometrici, materici e di degrado di alcuni siti appartenenti al Patrimonio Architettonico, tra cui le facciate rinascimentali di Palazzo Lenzi in piazza Ognissanti a Firenze, il monastero di Saint Miquel d'Escornalbou a Tarragona (Spagna) e il castello-fortezza di Trogir (Croazia).

CAPITOLO 1

I DIPINTI MURALI STRAPPATI E STACCATI: STORIA, TECNICHE E PROBLEMATICHE CONSERVATIVE DEI SUPPORTI

La realizzazione di una pittura murale necessita della presenza di un supporto murario (in pietra o in mattoni) sul quale applicare diversi strati di intonaco, composti da un inerte e da un legante – generalmente sabbia fluviale e calce spenta – in varie proporzioni. Tecnicamente per “*pittura a buon fresco*” si intende la stesura di materie coloranti diluite in acqua, ovvero pigmenti minerali senza alcuna aggiunta di leganti, su un intonaco umido applicato progressivamente in porzioni successive. Il numero e l’estensione di tali porzioni, altresì dette “*giornate*”, sono regolati dai tempi di carbonatazione dell’intonaco stesso che si esauriscono approssimativamente nelle 24 ore successive all’applicazione. Il fissaggio delle materie coloranti all’intonaco a base di calce avviene per intima coesione con il carbonato di calcio che si produce nell’interfaccia tra intonaco e strato pittorico. Una volta completato il processo chimico della carbonatazione della calce, il colore viene dunque completamente inglobato nel reticolo cristallino formatosi, acquistando così particolare resistenza all’acqua e agli altri potenziali agenti di deterioramento (Mora, 2001). Tuttavia, quando si innescano dei processi di degrado sul dipinto e sul supporto murario a causa dei quali l’unico modo per consentirne la conservazione è il suo strappo o stacco, il dipinto viene trasportato su un nuovo supporto mobile isolandolo dalla sorgente di degrado.

Inizialmente si cercò di fornire alla pittura staccata e/o strappata un supporto che fosse semplicemente idoneo a sostenerne il peso; infatti, nel caso del salvataggio del solo spessore pittorico, si riteneva sufficiente il suo trasferimento su una nuova tela, fissata ad un telaio (in genere di legno). Qualora lo spessore pittorico fosse risultato maggiore, veniva preferito un supporto rigido, di solito costituito da gesso o intonaco nuovo. Con il trascorrere del tempo, questi nuovi supporti cominciarono a mostrare i loro limiti e la loro incidenza negativa sulla conservazione dell’opera; ebbe dunque inizio una diffusa sperimentazione tecnica dei materiali a disposizione, finalizzata ad individuare una serie di requisiti ai quali avrebbe dovuto rispondere un supporto ottimale.

La tecnica dello strappo dei dipinti murali dal loro supporto naturale ha rappresentato, fin dalla metà del XVIII secolo, una delle principali metodologie per evitare la perdita del dipinto soggetto a processi di alterazione di varia natura e per scoprire la soggiacente sinopia realizzata sull’arriccio, (Fig. 1.1). La conservazione dei dipinti murali strappati e applicati su supporti mobili è oggi un tema di particolare attualità che risente della debole consapevolezza delle problematiche che interessano direttamente i supporti, tra cui: infiltrazioni di acqua, attacchi biologici, sistemi di ancoraggio non efficaci con conseguenti problemi strutturali. Tutta questa serie di fattori ha, inevitabilmente, delle conseguenze sulla pellicola pittorica, fino alla conseguente formazione di sollevamenti, *craquelures* e lacune.



Fig. 1.1 esempio di strappo di affresco da parete: (a) incollaggio delle tele anteriori tramite colla forte in grani scaldati a bagnomaria; (b) rimozione, dall’alto verso il basso, delle tele.

Masonite, Eternit, vetroresina, cannicci misti a gesso su controtelai in legno, sono solo alcuni dei materiali storicamente selezionati per svolgere la funzione di supporto per la ricollocazione dei dipinti murali. Sfortunatamente, in molti casi, essi sono pervenuti ai giorni nostri in uno stato di conservazione estremamente precario, perdendo la loro funzionalità primaria.

Tra i fattori che influenzano la loro corretta conservazione, la forma e costituzione risultano essere tra quelli maggiormente determinanti: ad esempio, laddove si trovano dei materiali

“laminati”, costituiti cioè da più pannelli, le deformazioni strutturali si concentrano soprattutto all’interfaccia tra questi. Inoltre, i supporti possono trovarsi in ambiente confinato (chiese, musei, etc.) o semi-confinato (chiostro, loggiato, etc.) e, sia per diversa costituzione materica che per diversa esposizione ai fattori ambientali, presentano peculiarità e problematiche conservative differenti. Nella sola città di Firenze sono molti i chiostrini che ospitano affreschi staccati riportati su varie tipologie di supporti (principalmente Masonite, vetroresina, rete metallica) che allo stato attuale mostrano evidenti segni di degrado a carico del supporto (Ciancabilla, 2022), (Fig. 1.2).

Un dipinto murale, una volta separato dal suo supporto originario, perde dunque molte delle sue tipiche caratteristiche fisico-chimiche, tra cui la porosità dell’intonaco e gran parte della componente minerale della pellicola pittorica. Inoltre,

col passare del tempo, i materiali usati nella foderatura, possono perdere parte della loro elasticità, provocando una maggiore fragilità della pellicola pittorica.

La sfida attuale è quella di saper individuare precocemente i fattori di degrado e quindi le cause delle alterazioni a cui sono soggetti i supporti, prevenendone la loro manifestazione nel tempo.





Fig. 1.2 alcuni chiostri fiorentini con dipinti murali staccati su varie tipologie di supporti (principalmente Masonite e vetroresina). 1. Chiostro dei Morti (chiesa di Santo Spirito); 2. Chiostro degli Aranci (Badia Fiorentina); 3. Chiostro dei Morti (basilica di Santa Maria Novella); 4. Chiostro di Sant'Antonino (basilica di San Marco); 5. Chiostro dello Scalzo (Via Cavour, 69, Firenze); 6. Chiostro di San Miniato al Monte; 7. Chiostro Grande (basilica di Santa Maria Novella); 8. Chiostro dei Voti (basilica della Santissima Annunziata); 9. Chiostro della Chiesa di Ognissanti; 10. Portico dell'Ospedale di Santa Maria Nuova; 11. Chiostro Verde (basilica di Santa Maria Novella).

1.1 Le varie tipologie di supporto dei dipinti murali strappati e staccati: dalla seconda metà del XIX secolo ad oggi. Storia e conoscenza materica.

La conoscenza del dipinto murale, dell'aspetto materico, ambientale e strutturale erano alla base delle operazioni di stacco degli affreschi, ed è proprio la costante ricerca di un metodo ideale che ha portato, nel corso del tempo, ad esplorare più tipologie di supporto.

Le prime operazioni di distacco risalgono ai tempi di Vitruvio e di Plinio il Vecchio, secondo una tecnica che prevedeva la rimozione delle opere insieme a tutto l'intonaco ed il muro che le ospitava: il cosiddetto "stacco a massello". Tale tecnica consisteva nel tagliare la parte muraria ai lati del dipinto e quella sottostante, asportando non solo l'affresco, ma anche una buona parte del muro sopra il quale era stato realizzato. Queste parti poi venivano rimosse a mezzo di assi di legno legate o catene. La tecnica non sempre garantiva l'integrità dell'affresco, infatti il suo utilizzo nel corso della storia è tutt'altro che lineare: utilizzata dagli antichi romani soprattutto per fare razzia di opere d'arte altrimenti inamovibili, come nel caso delle pitture murali che decoravano i templi e i palazzi di Sparta e Sicione, dopo essere stata abbandonata per secoli trovò nuova fortuna solo a partire dal Rinascimento, ma per soddisfare tutt'altre esigenze, favorendo la conservazione ai posteri di porzioni di affreschi che altrimenti sarebbero andati perduti per sempre (Ciatti, 2009). Uno splendido esempio di stacco a massello è quello dell'intera parete sud del *tablinum dei praedia* di Giulia Felice a Pompei, avvenuto nel 1755 (Guglielmi, Prisco, 2009). Nonostante il perdurare di questa tecnica, il trasporto a massello iniziò ben presto a rivelare i suoi limiti; oltre ad essere un'operazione macchinosa e costosa, esso non poteva configurarsi come una vera e propria opera di restauro. Questo intervento interrompeva un delicato equilibrio che si creava tra le pitture e le murature umide, le quali, una volta tagliate, provocavano l'evaporazione dell'acqua e la rapida cristallizzazione dai sali anche sulla pellicola pittorica. Il conte Giovanni Secco Suardo (1798-1873), restauratore e collezionista italiano evidenziò inoltre come questo metodo fosse incapace di rispondere alle esigenze conservative, condannando molte opere alla distruzione a causa dell'arduo problema del trasporto, che diventava ancor più complicato con affreschi di notevoli dimensioni (Secco Suardo, 1866). Considerata dunque una tecnica troppo difficile e dispendiosa, a partire dal secondo quarto del 1700, la rimozione del massello venne affiancata

e gradualmente sostituita dalle più innovative pratiche dello strappo e dello stacco che rappresentarono una vera e propria rivoluzione nel campo del restauro, della conservazione, ma anche del collezionismo del patrimonio murale mondiale.

La tecnica dello *strappo*, consistente nella rimozione della sola pellicola superficiale di intonaco e colore e nel suo trasferimento su supporto tessile, viene ritenuta un'invenzione italiana, praticata compiutamente fra il XVIII e XIX secolo: furono gli emiliano-romagnoli Antonio Contri (1650-1732) e Giacomo Succi i primi ad abbandonare la tecnica del taglio dal muro e a valersi di quella dello strappo. Del primo non rimane alcuna testimonianza documentaria circa i procedimenti tecnici e i materiali utilizzati nelle operazioni di adesione al nuovo supporto tessile; il secondo ne raccolse il testimone perfezionando la tecnica, insieme ai figli Pellegrino e Domenico Succi (Ciancabilla, 2009). Giacomo Succi è infatti l'artefice del più antico strappo che ancora oggi sia possibile contemplare. Si tratta di due dipinti, il primo raffigurante *Sant'Anna*, il secondo un *Profeta*, facenti parte della decorazione ad affresco realizzata da Bartolomeo Cesi nella cattedrale di Imola, da lui trasportati su tela nel 1775-76 e per questo sfuggiti alla demolizione della cappella che li ospitava. Tra i personaggi avversi a tale pratica vi era Francesco Leopoldo Cicognara (1767-1834), storico dell'arte e bibliografo italiano, secondo il quale lo strappo comportava la frantumazione del velo di carbonatazione, principio costituente dell'affresco (Cicognara, 1825).

Lo *stacco*, descritto da Ulisse Forni (1814-1867) e Gaetano Bianchi (1819-1892) come più sensibile perché garantiva la conservazione delle impronte del cartone e delle irregolarità dell'intonaco stesso, si diffuse largamente nell'Ottocento grazie agli interventi precursori degli "estrattisti" Pietro Palmaroli (1767-1828) e Giovanni Rizzoli (1799-1878), attivi rispettivamente sulla scena romana e su quella fiorentina e noti per aver operato i celebri stacchi dell'affresco della *Deposizione di Cristo* di Daniele da Volterra nella cappella Orsini della chiesa della Trinità dei Monti (1809-1812), degli affreschi raffiguranti *i condottieri Giovanni Acuto e Niccolò da Tolentino* dipinti da Paolo Uccello e Andrea del Castagno nel Duomo di Firenze (1842) e del ciclo degli *Uomini Illustri* di Andrea del Castagno a Villa Carducci Pandolfini nel 1850 (Ciatti, 2009)

Bianchi rivoluzionò il metodo dello stacco, prevedendo l'apposizione dell'intonaco staccato su un "incanniccato".

Questa soluzione presentava il duplice vantaggio di non introdurre nell'affresco sostanze estranee e facilmente deperibili quali colla, gesso e caseina e, soprattutto, di non alterare l'aspetto del dipinto (la stessa *Trinità* di Masaccio in Santa Maria Novella venne riportata da G. Bianchi su incanniccato). D'altro canto, il limite risiedeva nel peso che la pittura si trovava ad avere dopo che il supporto ad incanniccato veniva ricoperto con nuovo intonaco, creando difficoltà per la sua mobilità. Fu così che Ulisse Forni, in alternativa al metodo di trasporto su incanniccato usato da G. Bianchi, suggerì come soluzione un metodo alternativo senza intonaco che prevedeva l'applicazione del film pittorico sul supporto di incanniccato intonacato di «buona calcina», cioè utilizzando una «colla di calcio e cacio», che veniva stesa anche sul tergo della pittura, precedentemente posta su un telaio provvisorio e fatta aderire «così molle» all'intonaco dell'incanniccato (Mariotti, 1983).



Fig. 1.3 affreschi strappati "Le storie di Sant'Orsola" (Treviso) collocati su un supporto ad incanniccato e gesso.



Fig. 1.4 affreschi strappati "Le storie di Sant'Orsola" (Treviso) collocati su un supporto ad incanniccato e gesso.

La prassi "estrattista" conoscerà la sua più fortunata stagione nel secolo scorso quando, a partire dal secondo Dopoguerra, venne strappata e staccata un'innomerevole quantità di affreschi. Sulla scia emotiva causata dalla rovina di alcuni tra i maggiori capolavori del patrimonio pittorico murale (tra cui gli affreschi di Buffalmacco nel Camposanto di Pisa, i dipinti di Andrea Mantegna nella Cappella Ovetari agli Eremitani a Padova, o ancora le pitture di Giambattista e Giandomenico Tiepolo alla villa Valmarana ai Nani a Vicenza), venne a maturare la convinzione che lo stacco o lo strappo fossero gli unici metodi da impiegare, anche preventivamente, per preservare gli affreschi dei grandi maestri italiani ai posteri. Tale opinione venne tradotta su carta nel testo "Per la salvezza del nostro patrimonio artistico" pubblicato nel 1950 nella rivista "Il Ponte" a firma di alcuni dei massimi storici dell'arte dell'epoca, tra cui Roberto Longhi, Ranuccio Bianchi Bandinelli e Lionello Venturi. L'unica soluzione per impedire in futuro il reiterarsi di tanto scempio sembrava dunque essere quella di trasferire la maggior parte degli affreschi su un più "idoneo" supporto mobile, così da essere ricoverati velocemente in rifugi sicuri, come era stato fatto per le tele e le tavole a partire dal 1940. Questo diede avvio, a partire dagli anni '50 del Novecento, alla più imponente campagna di strappi e stacchi che l'Italia abbia mai conosciuto.

Tra tutto questo fervore estrattista, maggiore cautela venne espressa da Cesare Brandi nell'articolo "Sui problemi dei supporti", pubblicato sul primissimo numero del Bollettino ICR del 1950. Egli, infatti, era ben conscio che la questione della sostituzione del supporto originario rappresentava allora – come oggi – «uno dei problemi tecnici più

delicati del restauro, e di quelli che, più specificatamente, debbono considerarsi sempre in via di ulteriori evoluzioni e perfezionamenti» (Brandi, 1950). Sullo stesso articolo dichiarerà che: «dal punto di vista storico, la sostituzione del supporto non può considerarsi che un'extrema ratio, dovendosi cercare, ovviamente, di conservare l'opera d'arte, per quanto più tempo è possibile, nella massima integrità possibile delle sue condizioni originarie. Dal punto di vista estetico la conservazione del supporto non è così imperativa, richiedendosi soltanto che l'opera d'arte, nel cambio del supporto, non venga anche a subire alterazioni estetiche» (Brandi, 1950). Proprio in questo lavoro Brandi pose le basi di quella riflessione che verrà poi sviluppata più compiutamente nella "Teoria del Restauro" a proposito della bipolarità della "materia dell'opera d'arte" di essere al contempo "aspetto" e "struttura"(Brandi, 2000).

Quella che venne definita la "stagione degli stacchi" e della "caccia alle sinopie" (Grandin, 1989) iniziò con il distacco degli affreschi del Camposanto di Pisa, i cui lavori iniziati nel 1947 vennero effettuati sotto la direzione di Leonetto Tintori (1908-2000). Nel 1949, nel campo della sperimentazione dei supporti rigidi, si giunse a proporre – e poi ad eseguire – il trasporto degli affreschi del "Trionfo della Morte" su lastre di Eternit, incollate variamente con caseinato di calcio o Vinavil, innovando la pratica attiva fin dai primi decenni del Novecento che vedeva nel cemento il sostituto ideale del gesso (Centauro, 2012). La confezione di fibrocemento (Eternit o altre marche) si otteneva miscelando fibra di amianto con cemento Portland e impastando con acqua (Tintori, 1981). L'impasto veniva confezionato in cartoni che venivano poi sottoposti ad alte pressioni che ne aumentavano proporzionalmente la resistenza. Nel Bollettino ICR 5-6 del 1951, dopo un'ulteriore riflessione "Sui supporti rigidi per il trasporto degli affreschi" da parte di Cesare Brandi (Brandi, 1951), Salvatore Liberti firma una "Nota sull'Eternit" in cui evidenzia le cause di degrado dovute all'uso di supporti in questo materiale composito che egli definisce «materiale ancora più dannoso del cemento». (Liberti, 1951). In particolare, egli afferma che i conglomerati cementizi danno luogo sulla superficie pittorica ad efflorescenze di tre tipologie: i) efflorescenze di alcali liberi e idrolizzabili; ii) nitrati; iii) cloruri. Le cause del degrado delle pitture rimosse dal Camposanto di Pisa risultano tuttavia il prodotto di più fattori, associabili variamente al supporto, all'intonaco originale, all'inadeguatezza dei materiali usati durante il loro restauro e alle sfavorevoli condizioni ambientali di conservazione. Si

iniziarono dunque a testare nuovi materiali per la costruzione dei supporti, quali: legno compensato, Masonite (soprattutto in Toscana), particolari leghe metalliche e resine sintetiche.

Fu allora che, nel tentativo di sensibilizzare l'opinione pubblica riguardo tali tematiche, Roberto Longhi sentì per primo, anche sull'onda del successo della prima "Mostra di affreschi staccati" che Ugo Procacci allestì al Forte Belvedere di Firenze nel 1957, la necessità di proporre all'Istituto Centrale del Restauro (ICR) l'organizzazione di un'esposizione che ripercorresse la secolare storia e la fortuna della pratica del distacco delle pitture murali, una storia del gusto, del collezionismo, del restauro e tutela di quella parte fondamentale dell'antico patrimonio pittorico (Longhi, 1957). Suggestione che venne raccolta molti anni dopo dagli storici dell'Arte Claudio Spadoni e Luca Ciancabilla con la loro mostra "L'incanto dell'affresco," tenutasi nel 2014 a Ravenna e strutturata in un percorso storico-cronologico che si snodava dai primi masselli cinque-seicenteschi, ai trasporti settecenteschi (compresi quelli provenienti da Pompei ed Ercolano), agli strappi ottocenteschi, fino alle sinopie staccate negli anni settanta del Novecento.

Dagli anni '50 in poi, e fino a tutto il XIX secolo, un numero cospicuo di capolavori della pittura italiana furono strappati e staccati dalle volte delle chiese, delle cappelle, dalle pareti dei palazzi pubblici e privati che le accoglievano da secoli. L'alluvione di Firenze del 1966 fece il resto, mostrando al mondo intero la precarietà che condizionava la vita dei più straordinari affreschi italiani e proiettando la ricerca sperimentale verso la creazione di un supporto "ideale".

Il supporto ottimale che si cercava doveva rispondere – allora, come oggi – ad una serie di esigenze e avere le seguenti caratteristiche fisico-meccaniche:

- Impermeabilità;
- Resistenza chimico-fisica sia a lungo termine sia rispetto gli agenti atmosferici;
- Resistenza all'urto;
- Leggerezza: in virtù – in alcuni casi – delle grandi dimensioni degli affreschi, il peso e lo spessore dovevano essere ridotti al minimo per evitare gli eventuali problemi legati al trasporto e al rimontaggio;
- Adattabilità all'estensione, alla forma e alla materia del dipinto;
- Resistenza meccanica contro tutte quelle azioni tendenti a deformare la pellicola pittorica e in grado di supportare il suo

stesso peso senza flettersi;

- Il materiale del supporto doveva garantire un buon isolamento termico (doveva avere bassa conducibilità termica) e bassa capacità termica, per evitare possibili fenomeni di condensazione.
- Resistenza agli attacchi biologici; i materiali utilizzati per il supporto non dovevano costituire materia di nutrimento per alghe e funghi. In realtà in quasi tutti i supporti esiste uno strato biologicamente attaccabile costituito da una tela incollata con caseinato di calcio; questi due materiali possono costituire un supporto propizio per il proliferarsi di muffe soprattutto laddove ci sono alti valori di umidità relativa.
- Reversibilità; il supporto doveva essere tale da permettere in qualsiasi momento lo stacco del dipinto mediante semplici operazioni. A tale scopo serve il cosiddetto "strato di sacrificio".
- Facile reperibilità e basso costo.
- Stabilità dimensionale: il coefficiente di dilatazione termica lineare del materiale non doveva discostarsi troppo da quello della pittura per evitare possibili distacchi e fratture. Si definisce il coefficiente di dilatazione lineare "α" come l'aumento di lunghezza ΔL subito a pressione costante da un materiale di lunghezza unitaria L0 per un aumento di temperatura T di 1 °C, si misura in [°C⁻¹] ed è espresso come:

$$\alpha = \Delta L/L_0 \cdot 1/\Delta T$$

In tabella 1.1 vengono riportati i coefficienti di dilatazione termica lineare dei principali materiali utilizzati nei supporti.

Alla fine degli anni '50 e per tutto il decennio successivo, seguendo gli orientamenti forniti dall'ICR, si decise di sfruttare soprattutto le possibilità date dalle resine sintetiche per mettere a punto il cosiddetto "strato di intervento": un elemento posto tra la tela e il nuovo supporto che avrebbe dovuto agevolare la loro eventuale separazione laddove si fosse creata la necessità di una revisione del restauro, rendendo il questo modo il supporto reversibile. Tali operazioni però si dimostrarono tutt'altro che banali: in un primo momento lo strato di intervento fu realizzato con materie plastiche espanse, considerate le più idonee proprio per le loro caratteristiche di leggerezza e per la facilità con cui potevano essere rimosse meccanicamente o tramite solventi. Tra le più adatte vennero considerate il polistirolo (PS), il poliuretano (PU) e il polivinilcloruro espanso (PVC). Successivamente lo strato d'intervento fu realizzato con materiali diversi, come un sottile strato di amianto (1 mm), in sughero o un intonaco a

Materiale	Coefficiente di dilatazione termica lineare α (°C ⁻¹)
Ferro	0,12·10 ⁻⁴
Alluminio	0,23·10 ⁻⁴
Ottone	0,19·10 ⁻⁴
Marmo	0,10 - 0,20·10 ⁻⁴
Malta di calce	0,09·10 ⁻⁴
Calcestruzzo ordinario	0,12·10 ⁻⁴
Mattone	0,06·10 ⁻⁴
Legno (parallelamente alle fibre)	0,04·10 ⁻⁴
Legno (trasversalmente alle fibre)	0,58·10 ⁻⁴
Materie plastiche	0,50 - 1,00·10 ⁻⁴
Laminati in fibra di vetro	0,20 - 0,30·10 ⁻⁴
Poliestere in stirolo (UP) (carica: fibre di vetro)	0,18 - 0,25·10 ⁻⁴
Epossidica (non caricata)	0,03 - 0,90·10 ⁻⁴
Polivinilcloruro (PVC)	0,60 - 0,70·10 ⁻⁴
Polistirolo (PS)	0,60 - 0,80·10 ⁻⁴
Poliuretano (PU)	1,10-1,20·10 ⁻⁴
Masonite	0,67·10 ⁻⁴

Tabella 1.1 coefficiente di dilatazione termica (α) di alcuni materiali utilizzati per i supporti di affreschi staccati.

base di calce, sabbia, caseinato di calcio, vermiculite, perlite e acetato di polivinile (PVA) (Mariotti, 1983).

I supporti sperimentati fino ad allora furono dunque tra i più vari e sembrarono rispondere ai requisiti sopra enunciati. Tuttavia, con il passare del tempo, mostrarono una certa suscettibilità dovuta a vari fattori.

I seguenti paragrafi intendono descrivere dettagliatamente i vari supporti utilizzati storicamente e le specifiche problematiche conservative, tenuto conto che generalmente le problematiche riscontrate sui supporti (Masonite, telaio ligneo, vetroresina, rete metallica e supporti misti), sono ascrivibili a più fattori strettamente collegati tra di loro. La combinazione di materiali diversi determinano sollecitazioni meccaniche che concorrono a rendere i supporti vulnerabili, soprattutto quando si trovano inseriti in contesti ambientali non favorevoli ad una loro corretta conservazione. Le escursioni termiche giornaliere e stagionali, i possibili fenomeni di condensa sul fronte e sul tergo del supporto, determinano deformazioni meccaniche e contaminazioni biologiche. A causa delle dilatazioni termiche, della perdita di coesione della malta di allettamento e delle fluttuazioni termometriche, molti degli ancoraggi cedono e si verificano imbarcamenti dei pannelli con deformazioni localizzate.

I problemi principali legati ai dipinti murali staccati sono da ricercare nelle seguenti caratteristiche:

- struttura dei supporti, che può essere composta da vari strati e materiali diversi;
- vicende conservative e restauri pregressi
- differenti esposizioni ambientali;
- sistema di ancoraggio alla muratura utilizzato negli anni '60 e '70 del Novecento che non asseconda i movimenti di dilatazione termica dei supporti. Questo aspetto verrà analizzato separatamente nel Paragrafo 1.2.

1.1.1. Supporti in gesso e rete metallica

Tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo fu attivo in Toscana il restauratore Domenico Fiscali che, nel 1885, lavorò nel Camposanto Monumentale di Pisa staccando due storie del ciclo pittorico delle "Storie di San Ranieri" e riportandole su un supporto di rete metallica galvanizzata e gesso, interponendovi una tela per impedire al reticolato metallico di affiorare in superficie. Nel 1911, lo stesso Fiscali staccò l'illustre opera "La Madonna del Parto" di Monterchi dipinta da Piero della Francesca, per la quale adottò un supporto in gesso rinforzato da una rete metallica. In quell'occasione, sotto lo strato pittorico, venne scoperta la raffigurazione frammentaria di una Madonna con Bambino



Fig. 1.5 porzione di supporto in rete metallica e gesso del dipinto murale "La cacciata dal Paradiso terrestre e il lavoro dei progenitori"

della prima metà del Trecento, conservata oggi nella chiesa di San Simeone di Monterchi (Giorno, 1989). La stessa operazione di stacco e trasporto su rete con gesso e caseinato di calcio venne eseguita su due affreschi del lato Est del chiostro Verde di Santa Maria Novella, ovvero sulle scene: "Il Diluvio universale e la recessione delle acque" e "La cacciata dal Paradiso terrestre e il lavoro dei progenitori" di Paolo Uccello e bottega (Fig 1.5). In Fig. 1.6 è fornita un'immagine della sezione stratigrafica dei pannelli in gesso e rete metallica utilizzati tra fine 1800 e inizi 1900.

1.1.1.1. Problematiche conservative

Il problema legato a questo tipo di supporto era essenzialmente legato alla malta in gesso che tendeva a distaccarsi dall'intonaco originale: i due materiali a contatto possono infatti subire fenomeni di dilatazione e contrazione di entità differente proprio a causa dei loro diversi coefficienti di dilatazione termica. Altro fattore che influisce sulla resistenza della massa indurita è la presenza di acqua libera nei pori (acqua di imbibizione): essa, infatti, facilita lo scorrimento dei cristalli e ne basta l'1% per ridurre la resistenza a compressione fino ad 1/3 circa del valore che si ha a secco. I problemi relativi alla solfatazione risultano invece secondari: il supporto in gesso sembra non influire

Supporto in gesso e rete metallica

- A. Telaio in legno rinforzato all'interno
- B. Gesso in cui è affogata la rete metallica
- C. Rete metallica fermata al telaio in legno
- D. Intonaco e film pittorico
- E. Tele e colla

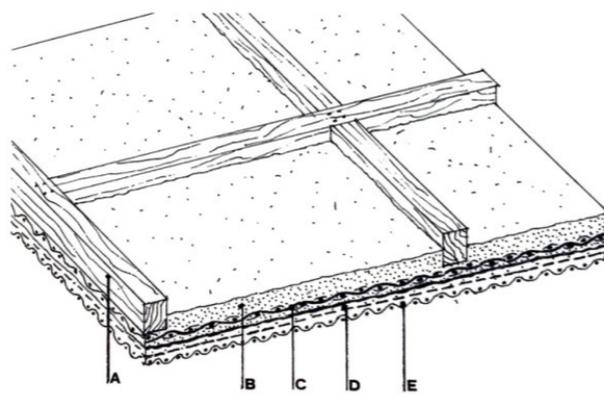


Fig. 1.6 sezione stratigrafica del supporto in gesso e rete metallica utilizzati tra fine 1800 e inizi 1900 (in Botticelli, 2010).

sulla formazione di solfatazioni superficiali; esso, infatti, a differenza di quello portato dagli agenti inquinanti, si trova in posizione relativamente distante dalla pittura, essendovi interposta, tra pittura e gesso la tela tergal e il rispettivo adesivo. Di conseguenza raramente si osservano effetti di solfatazione in pitture murali riportate su supporti in gesso, a meno che questo non sia preesistente all'intervento stesso (Mariotti, 1983). Per quanto riguarda invece la rete metallica, essa veniva realizzata soprattutto in ferro e più raramente in rame e ottone. Il ferro, a seguito di fenomeni di disidratazione e carbonatazione, si trasforma in sali basici che portano alla corrosione della rete stessa. Inoltre, i materiali di ossidazione del ferro possono migrare attraverso la struttura porosa e arrivare sulla superficie pittorica. Anche le reti di rame e ottone sono sensibili all'umidità, ma in maniera inferiore rispetto al ferro. L'ottone, poi, si altera ancor meno del rame che invece può ossidarsi a cuprite (Cu_2O) in grado di alterare la cromia del dipinto. Quando la variante alla rete metallica è invece costituita da incanniccio – un tessuto di canne inchiodato al telaio per essere sostegno dello strato di gesso – si possono verificare antiestetici fenomeni di chiazzatura sulla superficie pittorica a causa dell'estrema sensibilità all'umidità a cui è soggetto questo materiale (Botticelli, 2010).

1.1.2. Supporti in Masonite

A partire dal 1957 si iniziò a sostituire il precario supporto di tela con un supporto ritenuto più "resistente" e rigido, ovvero



Fig. 1.7 osservazione delle fibre allo stereo microscopio (80X).

la Masonite che venne utilizzata fino all'avvento e alla diffusione delle resine sintetiche nel 1963. Masonite è il nome commerciale di un materiale (noto anche come *Isorel*, *Hernit*, *Karlit*, *Torex*, *Treetex*) composto di fibre di legno trattate con vapore¹ (Fig 1.7 e 1.8) e successivamente sottoposte a forte pressione, secondo un procedimento inventato negli Stati Uniti nei primi decenni del Novecento dall'ingegnere William Mason, (Boehm, 1930). Il procedimento industriale consiste nel reperire scarti della lavorazione del legno che vengono poi puliti e introdotti in apposite autoclavi per essere impregnati di vapore sotto pressione (100 atm). Un repentino salto di pressione provoca l'espansione del vapore e l'esplosione delle fibre. Le fibre, ridotte in parti uguali, vengono raffinate con ulteriori lavorazioni e tramite sovrapposizioni orizzontali, si formano dei feltri resistenti, poi ridotti in rettangoli regolari. La parte fibrosa viene disidratata e portata ad elevate temperature. Successivamente viene laminata, sotto pressione, in forma di tappeto fibroso. Durante questa lavorazione la lignina, rammollendosi, funge da collante naturale che una volta raffreddata cementa le fibre insieme e le lega tra loro (Katlan, 1994). Una variazione di questo processo standard consiste nel sottoporre i pannelli ad un ulteriore trattamento con il calore o con olio, dando luogo al cosiddetto procedimento della tempra. Attraverso la tempra, si ottiene un materiale con migliori proprietà di resistenza, minore igroscopicità, maggiore stabilità dimensionale e maggiore durezza della superficie. Il tipo definito "temperato" è un materiale reso più resistente



Fig. 1.8 osservazione allo stereo microscopio di un frammento di Masonite con intonaco superficiale (1x).

all'umidità e all'abrasione attraverso l'impregnazione di resine e oli (www.tuttolegno.eu).

I pannelli di Masonite venivano fabbricati e venduti in formati standard, generalmente 450 x 125 cm² con uno spessore di 5 mm in Italia, mentre negli USA le misure standard dei pannelli masonite erano da 122 x 244 cm (3-6 mm) a 244 x 3000 cm (3-6 mm), (Fig 1.9). Tuttavia, potevano essere prodotti pannelli di spessori variabili (½ cm – 5 cm) e dimensioni fino a 2 m x 5 m. È possibile utilizzare la Masonite in forme composite per aumentare la superficie, lo spessore e la rigidità. Questi pannelli sono caratterizzati da una superficie levigata pressata più idrofoba e da un'altra scabra e rugosa, più sensibile all'umidità, sulla quale venivano apposte le tele di rivoltaggio e il dipinto staccato. La lignina, presente naturalmente nel legno, facilita il collegamento delle fibre senza l'aggiunta di adesivi, conferendo alla Masonite una discreta resistenza a trazione oltre che un'elevata densità e una considerevole stabilità. La Masonite è stato il materiale più comunemente impiegato in tutta l'area del centro Italia, per la realizzazione di supporti di dipinti murali staccati e risulta più resistente agli agenti atmosferici di altri derivati del legno e sicuramente più adatta di conglomerati cementizi o lastre metalliche. Con questo materiale è possibile realizzare superfici piane o curve relativamente regolari, come l'intradosso di un arco o una volta a padiglione o ad arco ribassato, ma è sostanzialmente inutilizzabile per costruire il supporto per dipinti staccati da costoloni o vele di volte a crociera particolarmente arcuate. Inoltre, a causa della bassa resistenza alla flessione e delle specifiche misure dei pannelli, è necessario utilizzare la Masonite in forme composite sia per raggiungere le forme e le



Fig. 1.9 pannelli di Masonite con formati standard.

dimensioni del dipinto, sia per arrivare al grado di resistenza desiderato.

Per questi motivi in passato sono stati formulati tre tipi di supporto: multistrato, tamburato e semi-tamburato (Fig 1.10).

- Il metodo di costruzione del supporto *semi-tamburato* prevedeva l'utilizzo di un piano di Masonite che veniva applicato ad un telaio generalmente di legno di abete. Il telaio era costruito con una struttura ortogonale più o meno fitta, simile per costruzione ad una "parchettatura alla fiorentina", costituita da assi verticali e orizzontali con incastri a mezzo legno. La struttura lignea era incollata alle lastre di Masonite tramite un caseinato industriale in polvere, piccoli chiodi e viti in ottone. Talvolta, poteva essere applicato dietro al telaio un altro pannello di Masonite, che aveva lo scopo di isolarlo dalla parete per evitare che il legno potesse risentire dell'umidità proveniente dalla muratura. La struttura del supporto poteva raggiungere uno spessore dai 3 ai 5 cm circa; pertanto, questo sporgeva dal muro e impediva di inserire l'affresco tra i due strati di malta originari, costituiti dall'arriccio e dall'intonaco pittorico.

- Il supporto *triplice strato* era formato da tre strati di Masonite, ognuno dello spessore di 5 mm, sovrapposti e incollati con caseinato industriale l'uno all'altro. Il primo strato era costituito da una o più lastre accostate e disposte lungo il verso longitudinale; su queste veniva posto un secondo strato di lastre, disposte seguendo un senso ortogonale; l'ultimo strato seguiva il verso longitudinale del primo. Le lastre di Masonite venivano collocate in modo sfalsato rispetto alle connettiture dei fogli precedenti, per evitare punti di debolezza e rendere il tutto quanto più uniforme possibile. Una volta che il caseinato aveva fatto presa, si utilizzavano ribattini in alluminio per bloccare l'insieme, assicurando le connettiture del supporto. Il supporto raggiungeva uno spessore di 15 mm.

- Il terzo tipo di supporto, quello *tamburato*, era costituito da tre strati di Masonite sovrapposti: i due esterni costituiti da pannelli di Masonite, il terzo interno da un'intelaiatura interna in Masonite di tipo reticolare. Il procedimento seguiva un metodo di costruzione analogo al precedente. Il supporto semi-tamburato probabilmente rappresenta la prima tipologia di supporto in Masonite. In alcuni casi è stato utilizzato perché aveva uno spessore

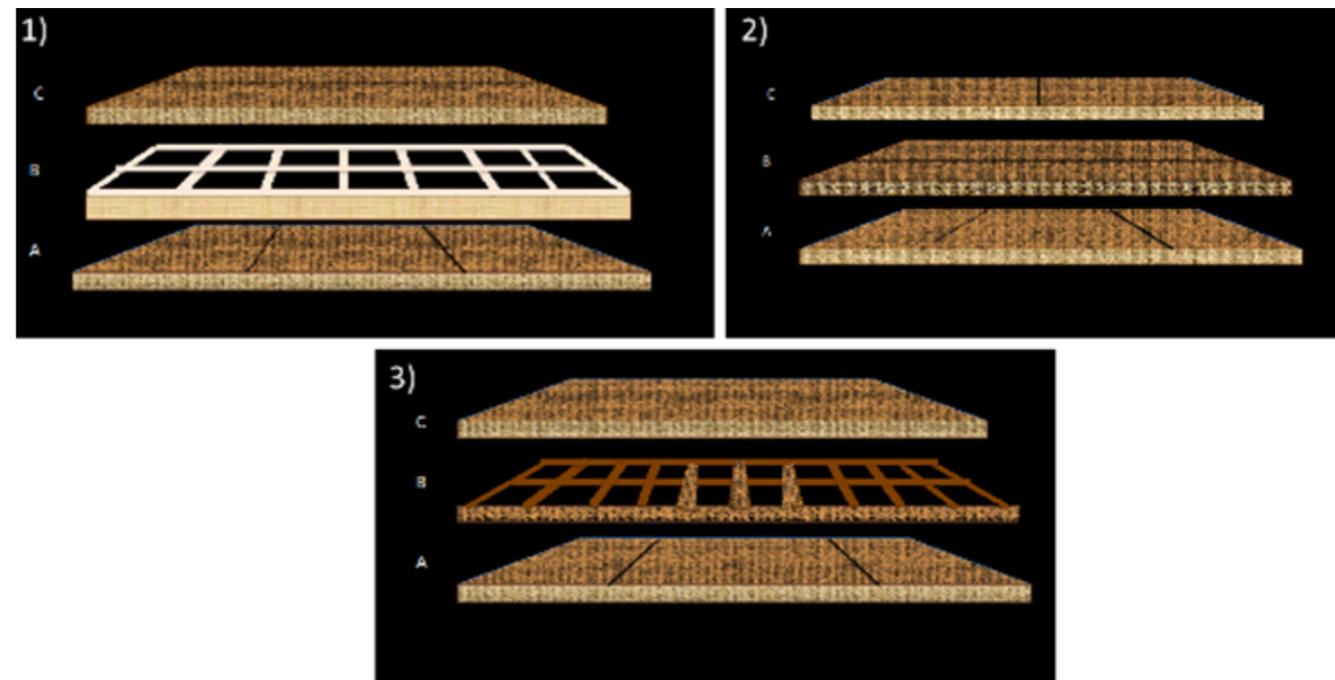


Fig. 1.10 1) supporto in Masonite semi-tamburato; 2) supporto in Masonite triplice strato; 3) supporto in Masonite tamburato.

che si adattava a quello dei supporti costruiti con il telaio di legno, tipici degli inizi del '900. Fu poi sostituito dalle altre tipologie di supporti in Masonite. I supporti in triplice strato e tamburato avevano, infatti, uno spessore limitato che permetteva di ricreare un piano uniforme con la parete.

1.1.2.1. Problematiche conservative

La Masonite cominciò tuttavia ben presto a mostrare fenomeni di degrado, legati soprattutto alla sua stessa composizione. La materia prima per la fabbricazione della Masonite è infatti il legno e, benché trattato e pressato, resta comunque un materiale idrofilo soggetto a notevole assorbimento di acqua che induce movimenti nella struttura della Masonite. Inoltre, la sua resistenza a flessione è molto ridotta, tanto da richiedere un rinforzo di un telaio. Un altro aspetto negativo per questo genere di supporto è rappresentato dal fatto che le lastre in Masonite venivano vendute in formati standard, tanto che per affreschi di notevoli dimensioni era necessario l'incollaggio di più lastre. Essendo esse sensibilmente soggette alle variazioni igrometriche, spesso le dilatazioni e contrazioni creavano delle vere e proprie rotture tra i singoli strati. Fra i derivati del legno furono impiegati, molto più sporadicamente, i pannelli

truciolari, compositi e di compensato, con i quali tuttavia non si riuscì ad abbandonare il difetto comune, cioè quello della loro sensibilità all'umidità.

Per valutare come l'umidità, l'acqua libera (acqua di imbibizione) e la temperatura agiscono sui comportamenti meccanici della Masonite, nel corso di questo lavoro di tesi, sono stati effettuati dei test presso i laboratori dell'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC) di Sesto Fiorentino. In particolare, sono state effettuate delle misure di densità, assorbimento di acqua, umidità di equilibrio e valutazione delle deformazioni massime subite in diverse condizioni ambientali (temperatura e umidità relativa), sia riprendendo in parte lo studio già affrontato da Calmanti (Calmanti 2015), sia effettuando dei nuovi test presso i laboratori di ISPC. È necessario specificare che i campioni hanno dimensioni variabili a seconda della prova: quelli per la misura della densità e dell'umidità di equilibrio effettuati nello studio di Calmanti M., erano di 10 cm x 5 cm in Masonite temperata, mentre quelli utilizzati per l'assorbimento d'acqua sono di 15 cm x 3 cm, sempre in Masonite temperata (Fig. 1.11).

Le misure di densità e di umidità di equilibrio sono state condotte inserendo i campioni in una cella climatica impostata

con le seguenti condizioni: 20°C e 65% U.R., 30°C e 35% U.R., 10°C e 80% U.R. Dopo essere stati inseriti in cella, i campioni sono stati lasciati equilibrare in ciascun clima fino al raggiungimento dell'equilibrio (questa condizione è stata individuata dall'invarianza del peso nel tempo) e quindi pesati e misurati, determinandone le variazioni in lunghezza, larghezza e spessore. A conclusione, i campioni sono stati posti ad essiccare in stufa a 103°C anche in questo caso fino a peso costante, e comunque per non meno di 48h.

Le misure di assorbimento d'acqua sono state effettuate inserendo tre campioni di Masonite temperata in acqua per 24 h. Prima della loro immersione essi sono stati pesati e misurati (lunghezza, larghezza e spessore), al fine di determinare le variazioni dimensionali al tempo 0 (T0), corrispondente

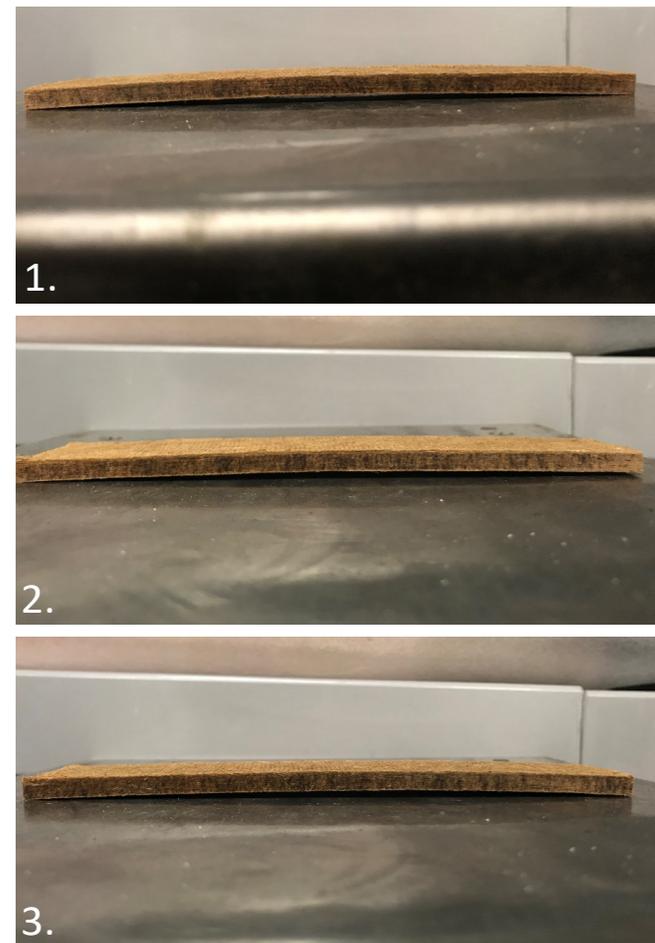


Fig. 1.11 campioni di 15x3 cm utilizzati per le prove di assorbimento di acqua al T0 (condizioni ambientali T=20°C; UR=65%).



Fig. 1.12 Prove di assorbimento di acqua. Immersione dei campioni, misura del peso e delle dimensioni tramite calibro digitale.

alle condizioni ambientali (T=20°C; UR=65%), dopo il primo essiccamento in stufa a 60°C per il raggiungimento del peso secco (T1) e dopo l'evaporazione dell'acqua libera assorbita (T2), corrispondente dunque al peso costante dopo saturazione. Le varie fasi della prova di imbibizione sono mostrate in Fig 1.12. I dati ottenuti dalle prove di Clamanti M. confermavano che i campioni di Masonite avevano una densità molto simile tra loro in tutte e tre le condizioni climatiche considerate, compresa tra 1,0 e 1,1 g/cm³. Inoltre, è stato riscontrato che i campioni non evidenziavano variazioni dimensionali rilevanti nel senso della lunghezza lungo i bordi, (ordine dello 0,1-0,3% rispetto al clima di riferimento T0), mentre le maggiori differenze sono state riscontrate per quanto riguarda le variazioni dello spessore. In particolare, i campioni di Masonite temperata dal clima più secco al clima più umido avevano subito un aumento con variazioni massime di circa 7% nello spessore.

I dati ottenuti dalle prove di imbibizione effettuate nei laboratori di ISPC, hanno mostrato variazioni di lunghezza e nella larghezza pari, rispettivamente, all' 1.6 % e allo 0.9 % tra peso secco (T1) e peso dopo saturazione (T2). Anche in questo caso i cambiamenti dimensionali maggiori sono stati riscontrati nello spessore: tra i campioni in condizioni ambientali (T=20°C; UR=65%), e quelli dopo saturazione è stato osservato un aumento medio dello spessore del 54.6 %. Questo fenomeno è dovuto al processo di produzione, a causa del quale le fibre di legno si allineano più o meno casualmente lungo la direzione di laminazione, da cui la sostanziale omogeneità di comportamento nelle due direzioni della superficie (lunghezza e larghezza). Contrariamente, la maggiore sensibilità verso l'umidità delle fibre nella loro direzione trasversale determina come conseguenza anche la maggiore variabilità delle dimensioni nella direzione perpendicolare alla superficie, e quindi nello spessore dei pannelli.

L'analisi per la valutazione delle deformazioni subite dai campioni a seguito della saturazione (T2) ha previsto l'utilizzo di un piano campione (chiamato "piano di riscontro") ed un comparatore digitale di precisione, con lo scopo di quantificare le deformazioni subite dai provini dopo l'invecchiamento artificiale (Grelk et al., 2004). Il piano di riscontro è un piano di ghisa, sorretto da un'incastellatura provvista di nervature di irrigidimento, a sua volta poggiante su dei piedini, la cui superficie è rettificata e liscia fino al punto che quest'ultima può essere considerata un piano perfetto. Su questo piano sono posati il campione di prova – poggiato a sua volta su

tre piedini in acciaio posizionati su punti prestabiliti – e il comparatore millesimale. Il set up di misura è mostrato in Fig. 1.13. Il comparatore utilizzato è dotato di un display digitale e uscita dati su porta USB (Mitutoyo). Il campo di misura è 30 mm - sensibilità 0,001 mm / 0,0005 pollici - gambo ø 8 mm - 220/9 v. L'elevata sensibilità consente di leggere variazioni minime. I tre piedini di sostegno, più bassi e di diametro 10 mm (si veda Fig 1.13), sono calamitati per il mantenimento della posizione e costituiscono l'appoggio del laminato (per 3 punti non allineati passa un solo piano). Gli altri tre cilindri in acciaio, più alti 3 cm e di diametro 2 cm, anch'essi calamitati costituiscono le battute laterali dei pannelli, per mantenerli in posizione ed evitare possibili spostamenti durante la misura. Il comparatore viene azzerato sul piano di riscontro prima di ciascuna misura della distanza della superficie del provino dallo "0" di riferimento. In questo caso la deformazione dei provini in masonite pre e post-imbibizione mostra un aumento della freccia tra T0 e T2 di 3,01 mm.

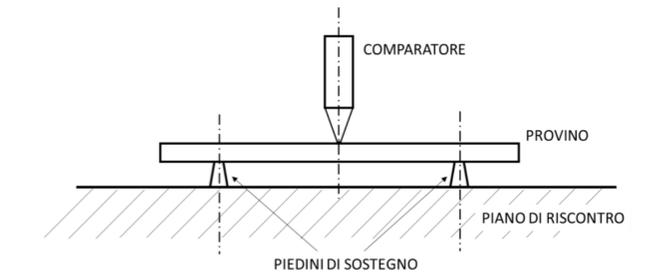


Fig. 1.13 descrizione del set-up di misura con il piano di riscontro utilizzato per il calcolo della freccia di imbarco dei provini in Masonite.

1.1.3. Supporti in vetroresina

Contemporaneamente alle sperimentazioni dei materiali analizzati nei paragrafi precedenti, a partire dal 1963, si diffuse ampiamente l'utilizzo delle resine sintetiche (dapprima la resina poliesteri, successivamente quella epossidica). Esse furono inizialmente impiegate come impermeabilizzanti (per esempio nei pannelli lignei di compensato) oppure come adesivi di materiali eterogenei. Si affermarono in largo consumo quando furono impiegate in combinazione con la fibra di vetro, generando così quello che viene chiamato "materiale composito". Con questo termine viene comunemente indicata l'associazione di matrici organiche – più precisamente resine sintetiche – con rinforzi fibrosi. Le resine sintetiche in questione possono essere sia termoplastiche che termoindurenti, mentre il rinforzo più utilizzato è sicuramente la fibra di vetro. I materiali compositi,

grazie alle loro eccezionali caratteristiche di leggerezza e resistenza e alla grande capacità di adattarsi a diverse tecnologie applicative, costituiscono oggi una grande famiglia di materiali strutturali di alto interesse progettuale e tecnologico, ed hanno aperto nuove prospettive di sviluppo in numerosi settori produttivi, tra cui il settore edilizio, nautico, industriale e dei trasporti e tessile.

Nell'ultimo ventennio si è verificato un risveglio d'interesse per le resine termoindurenti e in particolare per le epossidiche e le poliesteri, dovuto allo sviluppo dei materiali compositi. Entrambi i sistemi vengono manipolati e applicati con modalità pressoché analoghe, ma si differenziano notevolmente sia per comportamento che per caratteristiche finali. La scelta di una resina piuttosto che l'altra è dunque determinata da ciò che si vuole ottenere, dal procedimento di esecuzione che si deve seguire, dalla disponibilità del materiale, dalle prestazioni richieste e dal luogo di permanenza del materiale.

A seconda delle caratteristiche della resina e delle prestazioni si può dunque adottare un tipo di lavorazione piuttosto che un altro. Le resine poliesteri sono il prodotto di policondensazione tra acidi bicarbossilici e alcol polivalenti (glicoli), che vengono fatti reagire a loro volta con l'anidride ftalica. L'indurimento finale della resina avviene con l'aggiunta di un catalizzatore, solitamente viene utilizzato il perossido di metiletilchetone, abbreviato con l'acronimo "MEKP". Durante il processo di polimerizzazione ciò che modifica fortemente le proprietà chimico-fisiche e la durabilità di questi polimeri è sicuramente l'aggiunta di additivi, come le cariche inerti (CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Al_2O_3 , Caolino) aggiunti in percentuali in peso variabili all'1 al 20 %, che svolgono azioni di: opacizzazione, riduzione del costo, maggior precisione nello stampaggio, aumento della durezza, minor ritiro dimensionale, cambiamento dell'indice di rifrazione, aumento della massa, diminuzione degli stress meccanici. A seguito di una serie di ricerche iniziate nel 1959, si giunse alla realizzazione di pannelli in resina poliestere rinforzata e accoppiata a schiume poliuretatiche espanse. Questi due materiali eliminavano l'inconveniente della sensibilità all'umidità presente invece nei pannelli di Masonite, inoltre esse non necessitano di pesanti intelaiature di rinforzo: si presentano leggere, a basso costo, resistenti chimicamente e meccanicamente, ottimi isolanti termici e praticamente incombustibili. In realtà le resine poliesteri sono classificate come infiammabili, ma per applicazioni in cui si richiede la protezione da qualche rischio, esistono anche le

cosiddette "resine autoestinguenti". Una resina è classificata come autoestinguente quando la sua velocità di combustione è minore di 0,5 cm al m². Per quanto riguarda invece la fibra di vetro, essa veniva impiegata come feltro continuo (*mat*) costituito da fibre lunghe circa 50 mm disposte in tutte le direzioni e tenute insieme da un appretto, cioè un collante a base di resine artificiali che rendeva affine il vetro alla resina. La fibra di vetro, avente un diametro di circa 15/20 µm serviva dunque per dare struttura e resistenza alla resina e a seconda di quanto mat si impiegava si determinava poi lo spessore. Il rapporto resina vetro era generalmente di 2:1; la presenza di fibra di vetro nei suddetti supporti conferiva dunque l'insieme delle caratteristiche di resistenza alla trazione, alla flessione e torsione, rendendo il supporto sicuramente più idoneo a sostenere le sollecitazioni meccaniche. In particolare, l'unione tra resina e fibra di vetro conferiva al supporto anche caratteristiche chimico-fisiche, quali ad esempio:

- Resistenza ad acidi forti (H_2SO_4 , HCl, HNO_3) e a solventi come acetato di etile, Cellosolve, acetone (si ammorbidisce in benzene (C_6H_6));
- Buone caratteristiche dielettriche;
- Elevate proprietà in rapporto al peso specifico;
- Stabilità dimensionale (il coefficiente di dilatazione lineare delle fibre di vetro è pari a $0,2-0,3 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, mentre per le materie plastiche è $0,5-1,0 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
- Leggerezza;
- Basso costo;
- Facile preparazione.

Sulle base delle caratteristiche dei supporti formati invece da resine sintetiche, i tipi di supporto in resina rinforzata impiegata a Firenze e non solo, a partire dal 1963 fino ai giorni d'oggi, sono principalmente quattro: supporto rigido, supporto semirigido, a sandwich e di tipo avvolgibile.

- Il supporto rigido (Fig 1.14): è un supporto robusto costituito solamente da resina Poliestere e fibra di vetro, imbevuta nella resina per uno spessore medio di circa 7 mm
- Supporto semirigido: il suo spessore varia dai 3 ai 5 mm, ma non essendo dotato di rinforzi è applicabile solamente ad affreschi di piccole dimensioni.
- Supporto a sandwich (Fig 1.15): esso è costituito da due strati di resina poliestere (1-2 mm di spessore circa) con

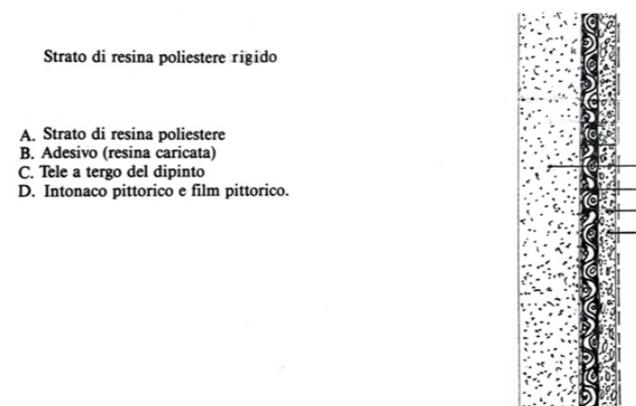


Fig. 1.14 sezione stratigrafica del supporto rigido in resina poliestere, (in Botticelli, 2010).

all'interno uno strato di schiuma poliuretana rigida, dello spessore di 1 cm. Spesso al posto del poliuretano viene impiegato un'anima a "nido d'ape" in cartone bachelizzato¹ o in alluminio. La rigidità e l'adesione fra gli strati viene spesso rinforzata tramite la realizzazione, nel poliuretano, di fori nei quali viene colata la resina. Tali supporti vengono ricollocati nella parete tramite staffe in acciaio o in ottone e non normali viti, proprio a causa della natura del supporto e del suo spessore;

- Il supporto di tipo avvolgibile: è stato adottato per la prima volta sull' "Albero della Vita" di Taddeo Gaddi, nell'ex refettorio di Santa Croce. Esso è costituito da resina Poliestere rinforzata con feltro di vetro tagliato direttamente in loco, quindi senza limiti dimensionali. In questo tipo di laminato lo spessore è molto ridotto, circa 1-1,5 mm. Date le sue caratteristiche e il suo spessore ridotto, questa tipologia di pannello può essere adottato anche per dipinti murali di notevoli dimensioni, purché venga rinforzato da sottili lamine di acciaio, di spessore e larghezza variabile a seconda delle necessità. Queste lamine vengono inserite fra il materiale di vetro e la resina, in modo da creare un'intelaiatura verticale che permetta all'affresco di assumere nuovamente una superficie planare e una migliore distribuzione del peso. Il grande vantaggio di questo tipo di supporti, soprattutto quando si aveva a che fare con affreschi di grandi dimensioni, era quello di poter essere trasportato con grande facilità, infatti l'affresco veniva protetto con canapa, ovatta di cellulosa o gomma piuma e poi avvolto su dei grossi rulli per permetterne il passaggio

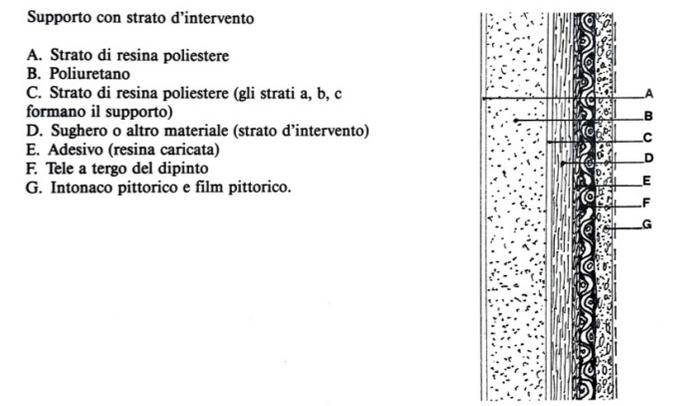


Fig. 1.15 sezione stratigrafica del supporto "sandwich" con strato di intervento, (in Botticelli, 2010).

attraverso luoghi impervi (scale, porte, finestre). Dunque, i supporti in resina rinforzata presentavano una serie di vantaggi (leggerezza, riduzione dello spessore, facilità di trasporto, resistenza chimica e meccanica) che fino agli anni Settanta nessun altro supporto era stato in grado di offrire.

1.1.3.1. Problematiche conservative

Per quanto riguarda la vetroresina si è osservato come in generale, gli ambienti potenzialmente aggressivi per i rinforzi fibrosi nelle condizioni di esercizio sono caratterizzati da (Amoroso, 2002; Shashoua, 2008):

- esposizione agli agenti atmosferici in ambienti caldo-umidi (radiazioni UV, cicli di umidità);
- escursione termica elevata (esposizione esterna degli elementi rinforzati);
- esposizione agli agenti atmosferici in climi freddi (cicli di gelo e disgelo);
- alte temperature;
- alto contenuto di umidità nel substrato (umidità di risalita), con possibile alta concentrazione di sali;
- esposizioni a soluzioni alcaline.

Gli effetti dell'umidità sul materiale composito sono complessi ed includono modificazioni nell'aspetto e nelle caratteristiche chimico-fisiche oltre che meccaniche. Tali modificazioni possono essere chimiche o fisiche, reversibili o meno. Di solito, l'indicatore più immediato della presenza di tali problemi è la riduzione della resistenza a rottura e del modulo elastico del composito. Per proteggere l'interfaccia

della fibra di vetroresina dall'umidità, le fibre di vetro vengono apprettate, di solito in una prima fase con polimeri a basso peso molecolare ed in una seconda fase con rivestimenti a base di silano (SiH_4) che sono scelti specificamente a seconda della matrice polimerica usata. L'apprettatura serve anche per migliorare la qualità dell'interfaccia fibra-resina e conferire maggiore compatibilità chimica tra la matrice e le fibre: nel caso della vetroresina si tratta di compatibilizzare le fibre, costituite prevalentemente da biossidi di silicio ed ossidi metallici di vario genere, con una matrice basata su composti idrocarburici. Nonostante il trattamento, può accadere che la matrice polimerica si separi dalle fibre dopo prolungata immersione in soluzioni acquose (o in ogni caso in acqua non distillata), specialmente se questo accade ad alte temperature. Tale scollamento, o *de-bonding*, viene spesso osservato nei

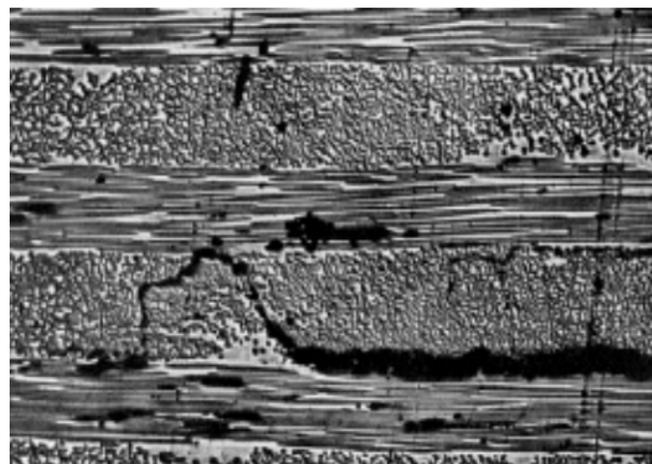
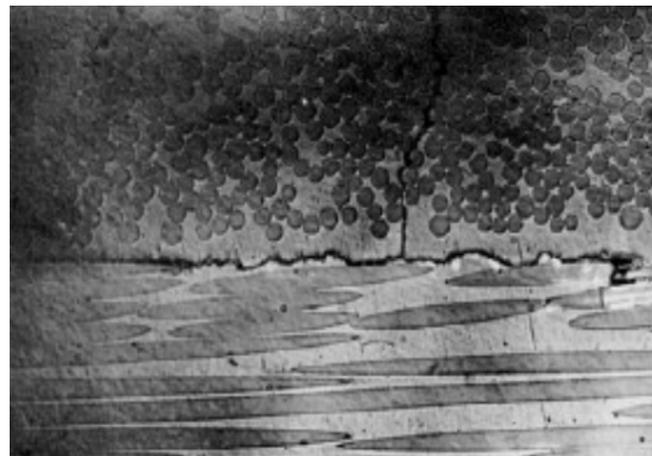


Fig. 1.16 osservazioni allo stereomicroscopio di cricche in una laminato in resina poliester e fibre di vetro multi-layer, (in Di Livio, Grassia, 2019).

laminati in fibra di vetro e resina Poliester anche ad occhio nudo o con modesti ingrandimenti al microscopio ottico, dato che la luce viene riflessa dall'interfaccia che si è separata, (Fig 1.16), (Santulli, 2017; Di Livio, Grassia, 2019). Per quanto riguarda le diverse tipologie di fibre, alcuni studi (Micelli, 2016), attestano che le fibre di carbonio mostrano una perdita trascurabile di proprietà meccaniche in ambiente alcalino, mentre tale problematica risulta particolarmente importante per il vetro, rappresentando, in quest'ultimo caso, la più forte criticità strutturale a lungo termine².

Per le fibre impiegate in un composito a matrice polimerica, è importante anche il ruolo protettivo della resina; pertanto, è fondamentale che la medesima non si degradi anche al fine di mantenere inalterato il suo ruolo meccanico in fase di trasmissione omogenea degli sforzi alle fibre. Per quanto riguarda le resine il meccanismo di degrado più pericoloso è l'idrolisi dei gruppi esterei, presenti all'interno delle resine poliesteri e vinilesteri, la cui dissoluzione porta alla formazione di un sale carbossilico e un alcol, con conseguente rottura della catena polimerica (Belloul et al, 2015)³. Oltre all'idrolisi, il deterioramento della matrice può essere causato da fenomeni di plasticizzazione e/o rigonfiamento causati dalla diffusione della soluzione alcalina all'interno della resina stessa che porta ad una riduzione della capacità della resina di trasferire i carichi tra le fibre; inoltre può avvenire un attacco alcalino all'interfaccia fibra-resina che degrada le proprietà macro-meccaniche del composito. La permeabilità della resina dipende tipicamente dalla tipologia di resina (composizione macromolecolare) e dal grado di reticolazione della stessa (Santulli, 2017).

Un altro fattore da tenere in considerazione è la metodologia di lavorazione dei laminati in vetroresina, che incide fortemente sul loro stato di conservazione. Il processo più semplice e tuttora molto adottato è quello della laminazione manuale (*hand layup*). Essa, pur prevedendo l'adozione di rulli che servono per impregnare tutto il tessuto di vetro con la resina, porta inevitabilmente all'introduzione di vuoti nella struttura, sotto forma di bolle d'aria e pori o sacche di resina. Queste disomogeneità, che rappresentano a tutti gli effetti dei punti di debolezza, possono saturarsi d'acqua e consentire una più facile penetrazione dell'umidità (Stamatakis, 2010). Oltre all'acqua essi possono essere luogo di deposito di sostanze estranee, impurità, e punto di ancoraggio per spore fungine e batteri. Allo scopo di minimizzare i vuoti ed ottenere, possibilmente, anche geometrie modificate rispetto alla semplice disposizione piana del laminato, spesso si utilizza la tecnica dell'infusione⁴. Naturalmente

è utopistico pensare che negli anni Settanta ci fosse questa premura nel fabbricare i laminati per supporto agli affreschi staccati. Generalmente, questi supporti venivano realizzati direttamente dai restauratori. Come testimonia l'esperienza del restauratore fiorentino Sabino Giovannoni⁵, solitamente chi eseguiva queste operazioni era solito preparare, in primo luogo, il piano di lavoro, stendendo su di esso due tipi di distaccanti: cera o alcol polivinilico caricati con dei pigmenti per vedere l'omogeneità della loro stesura. Successivamente veniva steso a pennello un primo strato abbondante di resina e, attraverso una macchinetta ad aria compressa, venivano gettate le fibre di vetro su di essa. Per distribuire bene la resina e impregnare completamente le fibre venivano usati dei rulli, uno zigrinato in alluminio ed uno in pelo raso per le rifiniture. Si procedeva poi alla stesura di più mat di vetro e resina, in base allo spessore che si voleva ottenere, ed il tutto veniva lasciato ad asciugare.

Un'altra criticità rilevata per la conservazione di supporti in vetroresina è il fatto che, sebbene le materie plastiche siano per lo più resistenti all'attacco microbico (a causa di una struttura chimica diversa da quella dei composti naturali, difficilmente vengono completamente degradate dai microrganismi presenti nell'ambiente), anche queste possono subire, con il passare del tempo, trasformazioni chimiche e fisiche dovute all'azione combinata di agenti atmosferici (esposizione alla luce, calore, pioggia, ossigeno, vento, ecc.) e di microrganismi che ne modificano le proprietà chimico-fisiche. Frequentemente si è potuto infatti constatare che in



Fig. 1.17 attacco biodeteriogeno su pannello di vetroresina.

condizioni caldo-umide, particolarmente favorevoli allo sviluppo microbico, questi materiali vengono colonizzati e danneggiati da microrganismi. Ad esempio, nei magazzini dei musei, dove spesso l'ambiente è caratterizzato da condizioni di scarsa ventilazione abbinata ad elevati tenori di umidità e temperatura, è frequente che dipinti moderni presentino alterazioni sotto forma di piccole macchie scure riconducibili allo sviluppo di funghi (un esempio di attacco microbico su vetroresina è mostrato in Fig 1.17) Anche negli ambienti ipogei, particolarmente umidi, spesso le resine utilizzate a scopo protettivo su dipinti murali possono manifestare attacchi fungini. I microrganismi possono dunque danneggiare la struttura e la funzione dei polimeri sintetici (Flemming, 1998).

I più frequenti microrganismi deteriogeni dei materiali sintetici sono soprattutto i funghi (*Aspergillus niger*, *A. flavus*, *Penicillium luteum*, *P. funiculosum*, *P. pullularia*, *Chaetomium spp.* e *Trichoderma spp.*) e, solo in minor misura e in condizioni di elevatissima umidità che si realizzano soprattutto nei casi di interrimento, i batteri. Sarebbe troppo lungo elencare la diversa suscettibilità al degrado biologico dei vari prodotti di sintesi utilizzati nel settore dei beni culturali, ma si possono comunque riportare alcune considerazioni generali che spiegano la diversa sensibilità al biodeterioramento di tutti i polimeri complessi. È noto infatti che, a parità di condizioni ambientali, la possibilità o meno che si realizzi un attacco biologico ad un polimero dipende dagli elementi chimici di base, dal tipo di legame intermolecolare, dal grado di polimerizzazione, dal livello di aggregazione delle molecole oltre che dal grado di solubilità o affinità per l'acqua, dal livello di idratazione e dalla presenza di frazioni monomeriche libere (ISAC, 2007). È per i motivi sopra elencati che ad esempio i prodotti sintetici emulsionabili sono più facilmente attaccati o che in presenza di sostanze plasticizzanti o frazioni monomeriche carboniose si possa creare rapidamente uno sviluppo di microrganismi.

A volte, in seguito ad assorbimento di una piccola quantità di umidità, non si notano immediate modificazioni nel comportamento del laminato, ma si osserva successivamente la presenza di fessure nella regione dell'interfaccia tra fibra di vetro e resina, oppure delaminazione o cricche trans-laminari, che portano ad un improvviso aumento dell'assorbimento di acqua, dovuto alla liberazione dell'umidità assorbita all'interno della struttura. Questi pori costituiscono sicuramente una via preferenziale per l'accumulo e lo

sviluppo dei microrganismi, soprattutto quando, come nella maggior parte dei supporti in vetroresina oggi riscontrati, essa risulta già molto compromessa e può presentare frazioni monomeriche libere. Questo meccanismo può avere dunque contribuito ad una ulteriore depolimerizzazione delle resine sintetiche utilizzate per la fabbricazione dei pannelli, causandone così anche l'aumento della porosità e facilitando il processo di invasione e colonizzazione del tessuto da parte dei patogeni, (Santulli, 2017).

1.2 I sistemi di ancoraggio alla muratura

L'ancoraggio è un aspetto della conservazione dei dipinti staccati a cui purtroppo non è stata data molta importanza, ma che spesso è fondamentale per una buona conservazione dei supporti staccati. Gli elementi più comuni utilizzati negli anni Cinquanta e Sessanta del Novecento erano costituiti da viti e staffe ancora oggi ben visibili e che spesso "deturpano" l'aspetto estetico del dipinto e lo fanno apparire come un dipinto fuori dal suo contesto murale. L'ancoraggio può perdere la sua efficacia nel tempo: il cedimento di un tassello nel muro o la perdita di tenuta di una staffa possono comportare sollecitazioni meccaniche e sforzi eccessivi sul supporto che, non avendo più un sostegno equilibrato, si deforma, dando luogo a instabilità, disconnessioni fuori piano o deformazioni localizzate. Questi fattori portano inevitabilmente a ripercussioni sulla conservazione dell'opera e, nei casi peggiori, possono comportare fratture con conseguente perdita della pellicola pittorica. L'elemento maggiormente ricorrente nei dipinti murali staccati nei chiostri fiorentini è la vite filettata in ferro o ottone lunga circa 5 cm, dotata di rondelle per bloccare la testa e utilizzata

per ancorare alla parete i supporti in Masonite o vetroresina (Fig. 1.18a). A queste viti veniva spesso accoppiato un tassello in plastica rigida, un esempio ne viene mostrato in Fig. 1.18b, raffigurante il tassello che il restauratore Leonetto Tintori adottò su un affresco strappato in vetroresina presente nella Cappella Castellani della Basilica di Santa Croce a Firenze, (Brizzi et al., 2023).

Generalmente le viti venivano inserite nei fori che venivano realizzati lungo il perimetro dei supporti (sia quelli in masonite, vetroresina, incanniccato o rete metallica); la disposizione delle viti non aveva un percorso preciso: a volte erano collocate in corrispondenza della stuccatura presente, altre volte addirittura sopra la pittura stessa. In genere, l'ancoraggio dei pannelli e la disposizione delle viti non venivano indicati dai restauratori, ma lasciati a chi si occupava della ricollocazione degli affreschi. La procedura operativa prevedeva un primo ancoraggio dei due angoli dell'estremità superiore, in modo da fissare il pannello nella cosiddetta "modalità a tenda", seguito dall'inserimento di tasselli e viti dove necessario, fino a quando il supporto non avesse aderito bene alla superficie. Non c'era quindi una pianificazione del numero e della posizione dei punti di ancoraggio, apparentemente casuale e asimmetrica, ma in realtà dettata dalla necessità pratica di far aderire il pannello al supporto murario (Giovannoni, 2020). Le teste delle viti venivano poi coperte con stucco ed eventualmente accordate cromaticamente. Quando il supporto era sporgente dalla parete, come nel caso dei supporti semi-tamburati, o particolarmente pesante, si utilizzavano staffe a "L", in ferro o ottone, che, inserite nel muro, sostenevano il supporto e talvolta ne fissavano i lati perimetrali (Fig. 1.18c).

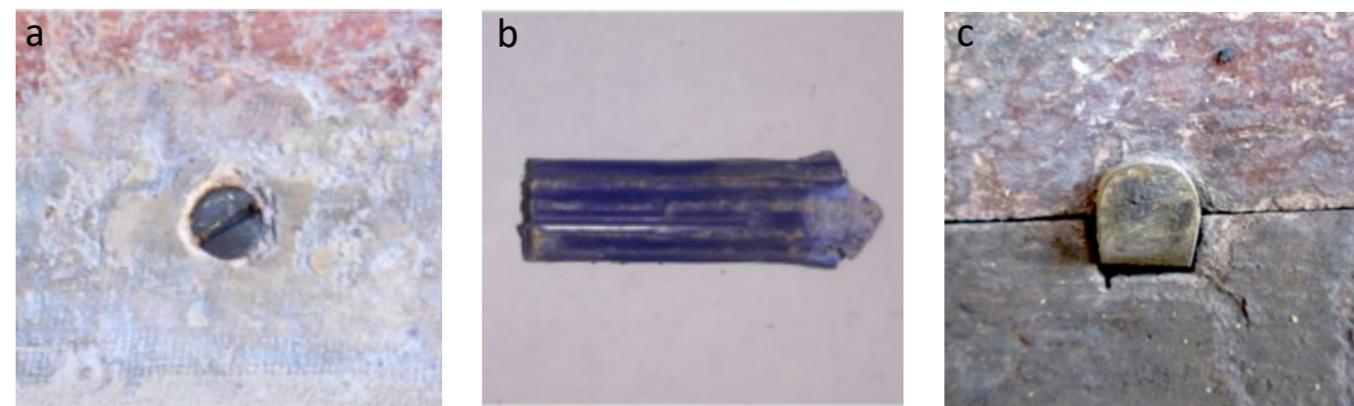


Fig. 1.18 a) vite passante nella muratura presente nel chiostro Verde di Santa Maria Novella; b) tassello in plastica rigida utilizzato per ricollocare un affresco strappato in vetroresina presente nella basilica di Santa Croce (cappella Castellani); c) staffa ad L presente nel chiostro Verde di Santa Maria Novella.

Molto spesso, la distribuzione delle staffe e dei tasselli a espansione che fissano i supporti alla parete non è uniforme e la tensione di questi ultimi non è calibrata in modo uniforme. Questo porta, nel tempo, a squilibri nelle strutture dei supporti. Le viti, a seconda della forza esercitata su di esse, possono cedere o esercitare una maggiore tensione nella struttura, che di solito può provocare disconnessioni fuori piano o deformazioni localizzate nel supporto, in quanto non è uniformemente ancorato alla parete, come in Fig 1.19.

Quando i sostegni sono vincolati in basso ma hanno punti di ancoraggio instabili o cedevoli in alto, possono anche essere soggetti al fenomeno di scorrimento⁶, cioè al fenomeno che li porta a deformarsi sotto il loro stesso peso che si scarica così in basso causando la deformazione del sostegno.

Anche in altri contesti, durante i sopralluoghi effettuati per verificare lo stato di conservazione dei supporti in Masonite esposti nei chiostri di Firenze, è stato possibile constatare il cedimento di alcune delle viti utilizzate per ancorare i pannelli staccati dovuto ad una duplice causa: la natura del materiale di loro costituzione e la mancanza di continuità con il supporto. Alcune di queste vite sono risultate essere in legno, caratterizzate da una filettatura solo nella parte finale che non ha garantito nel tempo un adeguato aggancio in tutto lo spessore del pannello; inoltre, i movimenti a cui sono stati soggetti i pannelli hanno comportato un allentamento e la conseguente espulsione delle viti.



Fig.1.19 deformazioni localizzate sulle aree dove ha ceduto il sistema di ancoraggio alla parete.

1.3 Individuazione degli obiettivi per una corretta conservazione

Nello scenario delle pitture murali staccate su varie tipologie di supporti risulta ormai evidente che i materiali utilizzati per i supporti hanno un tempo vita limite. Tutta la serie di problematiche conservative mostrate nei paragrafi precedenti legate ai supporti – e conseguentemente anche allo strato pittorico – stanno compromettendo la corretta conservazione dei dipinti, soprattutto dal punto di vista strutturale. Essendo questi fenomeni già in atto, è necessario valutare le cause e monitorarne gli effetti al fine di identificare delle soglie di rischio per un pronto intervento conservativo. Risulta fondamentale comprendere come i movimenti di dilatazione e contrazione dei supporti, sia che essi siano fisiologici o patologici, interferiscano con la pittura. I criteri per una corretta conservazione dei dipinti murali staccati devono prendere avvio dalle seguenti operazioni:

- Definizione del contesto nel quale i dipinti sono conservati: il rilievo a larga scala permetterà di definire il contesto architettonico nel quale gli affreschi sono inseriti, raccogliere e comprendere le informazioni rilevanti e stabilire gli obiettivi e i criteri di ricerca.
- Identificazione dei rischi: è il processo che porta all'individuazione di rischi specifici che possono poi essere analizzati tramite strumenti e strategie appropriate (in questo caso mediante rilievo in media scala e di dettaglio). Il secondo compito da adottare è l'effettuazione periodica di rilievi e sopralluoghi, utile a valutare come ciascun rischio influisce sulla conservazione dell'opera.
- Analisi del rischio: è il processo che porta alla misurazione e quantificazione di ogni rischio specifico identificato. In questa fase è possibile anche rivedere e perfezionare le analisi.
- Valutazione del rischio: è il processo che porta alla valutazione di ogni rischio specifico rispetto ad altri rischi o ad alcuni criteri. È necessario dunque valutare la sensibilità, l'incertezza, i vincoli e le opportunità offerte.

Alla luce dei risultati ottenuti dalle indagini, in collaborazione con gli enti preposti per la tutela del Patrimonio Culturale, sarà in seguito possibile predisporre le operazioni atte a:

- Ristabilire la corretta lettura estetica del dipinto;
- Ripristinare la stabilità del supporto, compreso il sistema di ancoraggio alla muratura.
- Conservare il supporto e l'affresco.

Note

¹ Materiale (legno, carta tessuto) che, disposto a strati, impregnato di resine fnoliche e successivamente compresso, assume proprietà che lo rendono utilizzabile come materiale isolante e di rivestimento, simili a quelli della bachelite.¹ Materiale (legno, carta tessuto) che, disposto a strati, impregnato di resine fnoliche e successivamente compresso, assume proprietà che lo rendono utilizzabile come materiale isolante e di rivestimento, simili a quelli della bachelite.

² Per ovviare a questa intrinseca vulnerabilità della fibra di vetro, è stata sviluppata, già nei settori industriali prima che in quello civile, una fibra alternativa, denominata fibra AR-glass (Alkali Resistant) ad elevato contenuto di ossido di Zirconio (16÷20%). In questi casi, durante l'esposizione in bagno alcalino, sulla superficie della fibra si forma uno strato di tale ossido che ne aumenta fortemente la resistenza chimica contro attacco alcalino, rallentando così molto sensibilmente la diffusione degli ossidrili OH- che causerebbero la rottura dei filamenti di vetro (Navarro e Mari 1990).

³ Le resine vinilesteri presentano una concentrazione decisamente inferiore di gruppi esterei, quindi una ridotta sensibilità all'idrolisi rispetto alle Poliesteri tradizionali. Le resine Epossidiche non presentano gruppi esterei, quindi sono molto meno sensibili all'idrolisi, infatti sono quelle maggiormente utilizzate nei compositi strutturali.

⁴ Essa prevede l'utilizzo di una pellicola antiaderente in teflon, posta sopra al tavolo di laminazione, sulla quale viene stesa la fibra e la resina e viene creato il sottovuoto. Il tutto viene preventivamente coperto con teli apposti e viene poi inserito un tubo di aspirazione, che serve per creare il sottovuoto e richiamare la resina dalla parte opposta, riuscendo a ricoprire tutta la superficie senza la formazione di bolle d'aria o sacche di resina. Con questo tipo di lavorazione la quantità di resina diminuisce enormemente: di solito per i laminati si ha un 70% di resina e un 30% di fibra, con l'infusione questo rapporto viene invertito; quindi, si ottengono materiali molto leggeri e con resistenze molto elevate.

⁵ Giovannoni S., intervista sulla metodologia di trasposizione degli affreschi strappati su supporto in vetroresina negli anni '70-'80, Firenze, 2020.

⁶ La deformazione per scorrimento è la conseguenza di uno sforzo applicato a un materiale appoggiato su una superficie piana, in cui il lato inferiore è vincolato e non può muoversi, mentre sul lato superiore viene esercitata una forza. Quello che si ottiene è una deformazione che tende ad inclinare i lati verticali del materiale (Rosati 1994: 13).



CAPITOLO 2

IL CASO STUDIO DEL CHIOSTRO VERDE
PRESSO LA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

CAPITOLO 2

IL CASO DI STUDIO DEL CHIOSTRO VERDE PRESSO LA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

In tale capitolo viene mostrato il chiostro Verde e le problematiche conservative del grande ciclo di affreschi in esso conservato. Il chiostro fa parte al complesso del convento di Santa Maria Novella, appartenuto all'ordine domenicano a Firenze. Oggi il chiostro rientra nel Museo di Santa Maria Novella, uno dei musei civici della città. Dal chiostro Verde, vero cuore del complesso, si accede al Cappellone degli Spagnoli, al Chiostro dei Morti ed al Chiostro Grande. Il chiostro venne affrescato con pitture in terra verde, da cui il nome, da Paolo Uccello e altri pittori quali Dello Delli tra

il 1425-1430 (Fig. 2.1). Restaurato nel 1859, fu gravemente danneggiato durante l'alluvione del 1966. Gli affreschi furono tutti staccati e ricollocati su varie tipologie di supporti tra cui Masonite, vetroresina e rete metallica. I dipinti murali vennero ricollocati in sede solamente nel 1983, anche se per alcune lunette i restauri procedono tutt'oggi. Quello che infatti si nota è l'avanzamento delle problematiche conservative legate ai supporti, che mostrano ormai un tempo vita limite. In tale scenario è stato necessario programmare un intervento diagnostico e un monitoraggio periodico dei



Fig.2.1 il chiostro Verde in Santa Maria Novella a Firenze.

dipinti murali che ha preso avvio dai criteri dettati dalla conservazione programmata e dalla gestione del rischio. La redazione di schede di catalogazione, strutturate intorno a varie macro-aree specifiche, si dimostra come un valido strumento per la gestione dei dati ed il loro futuro utilizzo.

2.1 Il ciclo di affreschi del chiostro Verde di Santa Maria Novella: storia e restauri

All'interno dell'antico complesso fiorentino di Santa Maria Novella, edificato dalla comunità domenicana a partire dalla metà del XIII secolo (Fig. 2.2), il cosiddetto chiostro Verde, come è noto, occupa lo spazio compreso tra il fianco occidentale della Basilica e l'antico Refettorio. Il Chiostro Verde dà inizio al percorso di visita dell'area del complesso che, a seguito delle soppressioni degli ordini religiosi del 1866, entrò nella disponibilità del Comune di Firenze e fu

da questo adibito a museo. Sia che vi si acceda dalla parte conventuale del complesso della chiesa (passando dalla porta ubicata tra la quarta e la quinta campata della sua navata orientale) sia che vi si giunga dall'esterno (attraverso l'antico passaggio posto a fianco del sagrato sulla sinistra), questo è il primo dei cinque chiostri di Santa Maria Novella realizzati in epoche diverse che si incontra e anche il primo ad essere edificato (Felici, Pini, e Vigna 2007), Fig. 2.3 e 2.4. È noto infatti che l'area del Chiostro Verde era già definita come tale almeno dagli inizi del 1300 e che gli edifici che ne circoscrivono il perimetro sono sorti tra il tardo Duecento e la metà del Trecento. Entrambi gli architetti ai quali, per antica tradizione, si riferisce la costruzione del chiostro, ovvero Jacopo Talenti e Giovanni da Campi, erano presenti nel convento almeno dal 1316 (Colucci, 2021). La costruzione del chiostro ebbe inizio intorno al 1332 a partire dal lato orientale adiacente alla chiesa, e si protrasse per un arco di tempo di



Fig.2.2 facciata della basilica di Santa Maria Novella a Firenze, con ingresso laterale che porta al chiostro Verde.

oltre trent'anni in concomitanza con altre importanti opere tra cui l'edificazione del Capitolo e l'ampia aula oggi nota come Cappellone degli Spagnoli che ha l'ingresso al centro della parete settentrionale del medesimo chiostro. Il chiostro ha pianta quadrata, con sette campate per lato, anch'esse di pianta quadrata sorrette da pilastri ottagonali. Mentre

il Capitolo era già interamente affrescato intorno al 1396 (almeno per le parti della decorazione antica che si possono osservare), poche sono le pitture trecentesche di cui abbiamo riscontro per il Chiostro Verde: sulla parete settentrionale, i) la scena de *L'Albero dei domenicani* (seconda metà del secolo); ii) la raffigurazione di uno *Scheletro tra due Profeti*

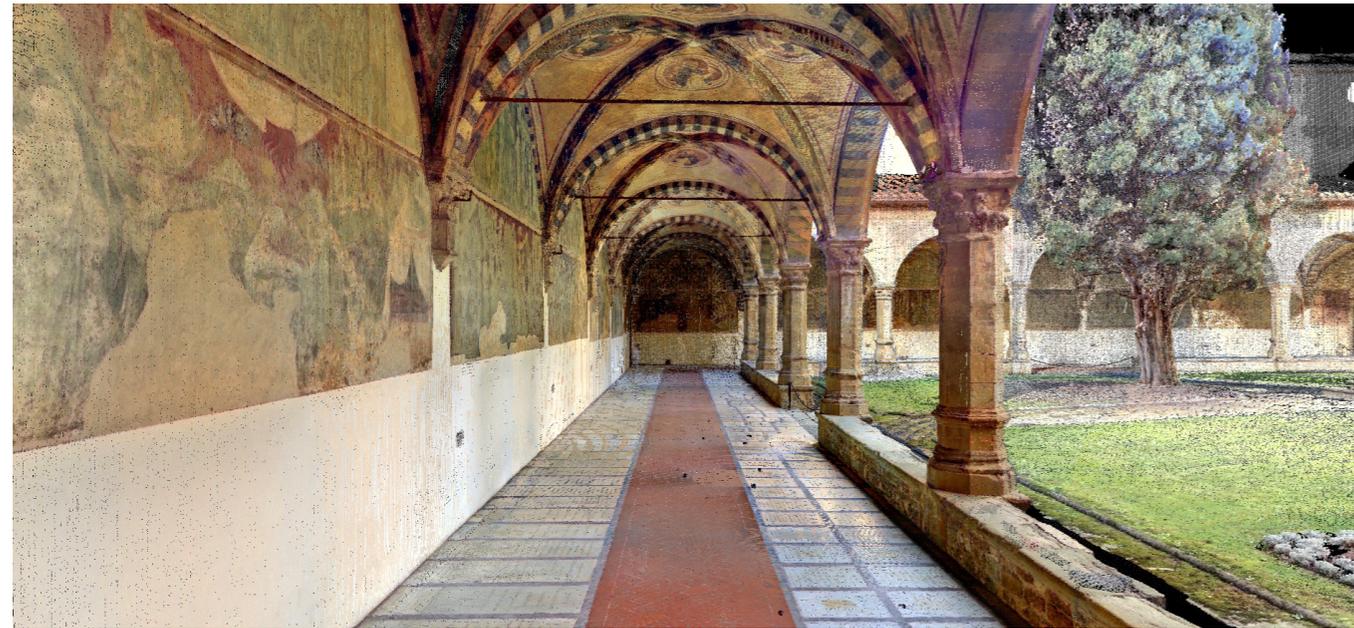


Fig. 2.3 vista prospettica da nuvola di punti laser scanner del lato Sud del chiostro Verde in Santa Maria Novella.



Fig. 2.4 vista prospettica da nuvola di punti laser scanner del lato Ovest del chiostro Verde in Santa Maria Novella.

e altri frammenti pittorici non più leggibili sull'ingresso del corridoio che conduce al Chiostro dei Morti; iii) una lunetta raffigurante *la Madonna con Bambino* di ambito fiorentino-senese, collocata sopra l'altare della Visitazione dove un tempo si trovava la porta del primo nucleo del convento. Nell'ultima campata verso Nord del lato occidentale, restano visibili: i) la scena del *Crocifisso tra i santi Domenico e Tommaso d'Aquino*, attribuito dal Vasari a Stefano Fiorentino e più recentemente riferito ad Andrea Bonaiuti; ii) nelle vele delle volte, i *Busti di Santi e beati domenicani* entro cornici quadrilobate, integralmente ridipinti nei primi decenni del XX secolo, ad eccezione di quelli ad Est e di parte di quelli a Ovest. Tra le testimonianze pervenute, non vi è niente che lasci presupporre la presenza di altri affreschi nelle pareti Est, Sud e Ovest prima del XV secolo, ovvero prima dell'inizio della stesura del grande ciclo in terra verde che avrebbe poi caratterizzato l'intero chiostro Verde (McAlister, 2003). Un vuoto di notizie ancora più sconcertante grava sulla genesi di questo ciclo. Malgrado l'assenza di riferimenti diretti, la sua origine viene tradizionalmente collegata a un testamento del 1348 con il quale Turino Baldesi, uno dei sostenitori della costruzione della nuova basilica, aveva lasciato mille fiorini d'oro a Fra' Jacopo Passavanti, Operaio di Santa Maria Novella, perché facesse dipingere entro un anno, all'interno della chiesa, tutta la storia del Vecchio Testamento (Frosinini 2021). Poiché nella chiesa un ciclo di questo genere non fu mai realizzato e nel complesso di Santa Maria Novella le pitture murali in terra verde sono le uniche che illustrano, se non l'intero Antico Testamento, una parte considerevole del suo primo libro dedicato alla Genesi, ha trovato ampio consenso l'ipotesi che l'esecutore testamentario avesse deciso fin dall'inizio di volgere il lascito alla decorazione del primo chiostro, allora in costruzione, e che l'attuazione del progetto sia rimasta sospesa fino ai primi decenni del secolo seguente. L'ipotesi che il programma delle Storie della Genesi fosse già abbozzato intorno alla metà del XIV secolo supporta la tendenza della critica ad attribuirgli significati che presuppongono relazioni con gli affreschi trecenteschi presenti nel medesimo chiostro e con la decorazione della prospiciente Aula Capitolare, come se tutte queste pitture facessero parte di un unico grande ciclo (Stahlbuhk, 2019).

Come è storicamente riconosciuto dalla critica, le numerose scene che compongono il ciclo mostrano differenze stilistiche così pronunciate da indurre a pensare che non solo siano di mano di artisti diversi, ma anche che questi abbiano lavorato indipendentemente gli uni dagli altri, in qualità di esponenti di

distinte botteghe. Solo di due di questi artisti la storiografia ci ha tramandato i nomi. Come è noto, il primo, quello cui si deve la fama del ciclo, è il fiorentino Paolo Uccello che, secondo la concorde testimonianza delle fonti, dipinse le prime due campate istoriate del lato orientale, con *la Creazione degli animali, la creazione dell'uomo e della femmina, ed il peccato originale*, e nella medesima parete, dopo «due storie di mano d'altri» il celebre *“Diluvio”* e *“Il Sacrificio e l'Ebbrezza di Noè”*, (Minardi e Guglielmetti, 2017). L'altro nome è quello del pittore e scultore Dello Delli, amico di Paolo Uccello e, come questo, collaboratore di Lorenzo Ghiberti per la Porta Nord del Battistero fiorentino, presente a Venezia tra il 1425 e il 1430, documentato a Firenze nei tre anni seguenti, prima della partenza per la Spagna e poi, di nuovo, dal 1446 al 1448. Secondo la tradizione vasariana, Dello Delli avrebbe dipinto *“la storia d'Isaac quando dà la benedizione ad Esau”* nella parete di fondo della prima campata del lato occidentale e sarebbe stato ritratto da Paolo Uccello nella figura di Cam presente nell'*Ebbrezza di Noè*. Il ciclo veterotestamentario in terra verde iniziava con la *“Creazione degli animali”*, nella campata adiacente al portale d'ingresso alla chiesa del lato Est, per continuare nelle restanti cinque campate della galleria, proseguendo in senso orario sulle altre sei campate del loggiato Sud e altrettante in quello Ovest. Un primo aspetto di rilievo che emerge dall'analisi del programma è quello della sorprendente quantità di scene rappresentate. Anche considerando solo le pitture che ancora oggi si conservano in loco, il ciclo della Genesi occupa quasi interamente le pareti Est, Sud e Ovest del chiostro. Ciascuna campata del chiostro



Fig. 2.5 Museo di Santa Maria Novella, lato Ovest, terza campata. Foto storica degli anni Trenta (?): residui delle finte colonne e dell'inconcrincatura.

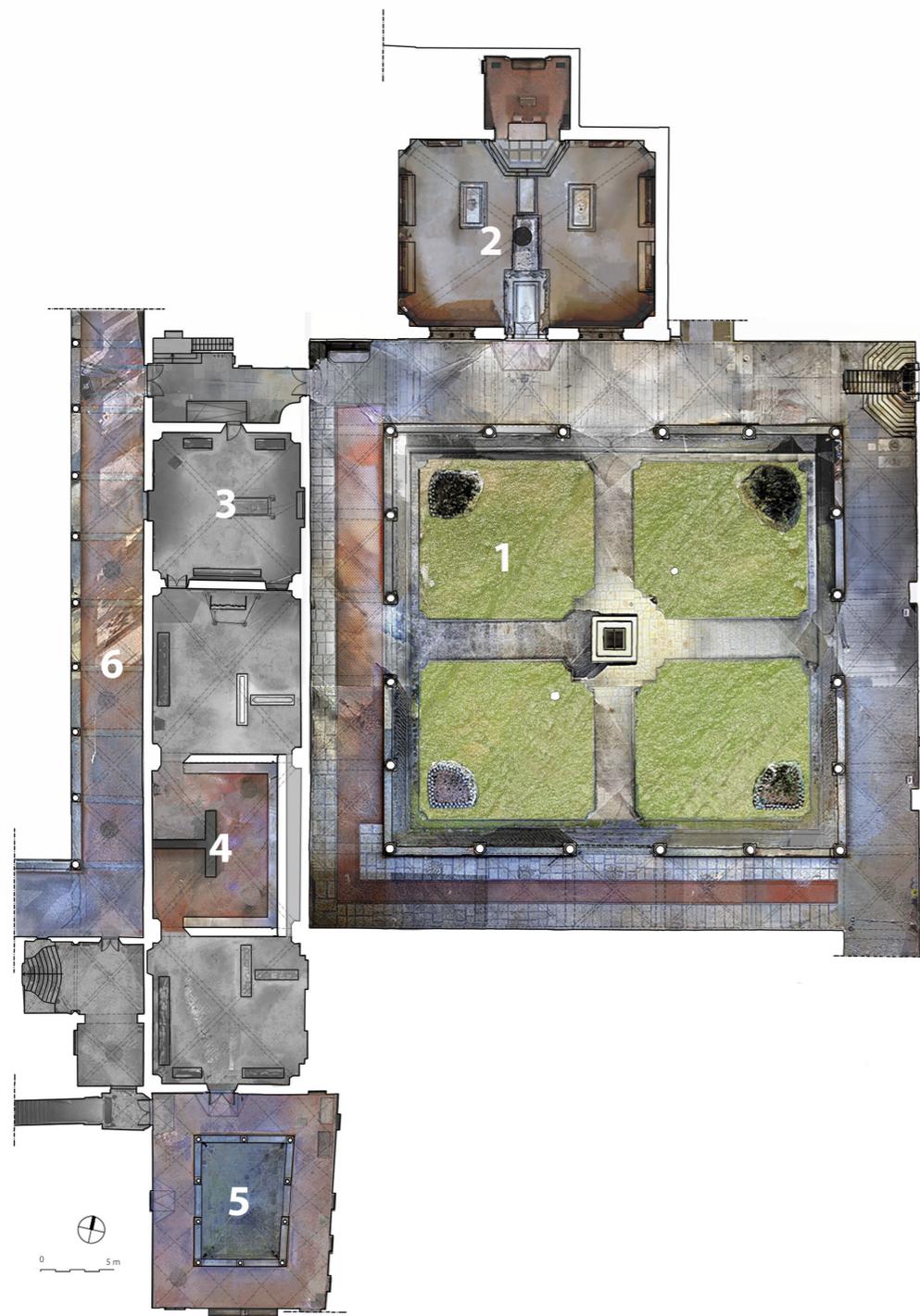


Fig.2.6 planimetria del chiostro Verde con parte del Museo di Santa Maria Novella: 1. Chiostro Verde; 2. Cappellone degli Spagnoli; 3. Cappella degli Ubriachi; 4. sala mostra "a sugo d'erbe e terra verde" con i primi 8 affreschi restaurati del lato Est del chiostro Verde; 5. Chiostro Dati; 6. Porzione del chiostro Grande.



Fig.2.7 quarta e quinta campata da sinistra, lato Sud. I dipinti murali staccati sono formati da due registri, inferiore e superiore.

ospita nella parete di fondo una lunetta e un registro inferiore di forma rettangolare, secondo uno schema ripetitivo, variato solo dalla presenza a Est delle sagome sporgenti dei pilastri del fianco sinistro della chiesa e dal disallineamento della partizione interna di una delle campate dello stesso lato. Prima dell'ultima campagna di stacco delle pitture, la decorazione era completata da uno zoccolo in finto marmo e da colonne con capitelli corinzi dipinte in corrispondenza dei peducci che sostengono i costoloni delle volte (Fig. 2.5). I due registri sono separati tra loro da una fascia che nelle prime quattro campate istoriate della parete orientale crea un motivo di conchi bianchi e neri in prospettiva, mentre sulle altre pareti riporta, in stato frammentario, iscrizioni in volgare a caratteri gotici che descrivono le scene rappresentate, secondo il comune ordine di lettura da sinistra a destra e dall'alto in basso (Fig. 2.7). Le scene sono in tutto più di settanta, distribuite in numero variabile, da una a quattro, nelle trentadue pitture che oggi compongono il ciclo, generalmente in sequenza, da destra verso sinistra, ma in certi casi anche con una più complessa articolazione a diversi livelli di profondità, (Felici, Pini, e Vigna 2007). Le vicende conservative legate agli affreschi nel chiostro Verde sono molto articolate. Le principali fonti sugli interventi nel chiostro si hanno a partire dai primi anni dell'Ottocento. Nel 1850, sotto il priorato di Fr. Giuseppe Ricca, i cavalli delle truppe austriache di stanza a Firenze vennero alloggiati sotto le arcate del chiostro Verde e di quello Grande, le cui campate furono murate a stalle. Sui muri decorati furono appoggiati infissi, mangiatoie, rastrelliere, traverse di legno e sostegni di ferro che danneggiarono tutta la parte inferiore

delle pareti dipinte. Le stalle rimasero allestite fino al 1852 e soltanto l'anno successivo furono smantellate in modo che potessero iniziare i lavori di restauro (Rinaldi 1998). Successivamente, nel 1895, il Comune promosse un nuovo intervento di restauro nel chiostro. Vennero restaurati il campanile, ricostruiti i muriccioli e i pilastri, decorati i sottarchi e i paramenti esterni a conchi bianchi e neri, rimosso un terrapieno a ridosso delle pareti del chiostro. Una planimetria di come si presenta ad oggi il chiostro ed i locali annessi è fornita in Fig. 2.6.

Per quanto riguarda l'apparato decorativo, i lavori di restauro delle volte e delle pareti furono affidati, a fine 1800, a Gaetano Bianchi che qui si limitò a un intervento di tipo conservativo: pulì le pitture, fermò gli intonaci che minacciavano di cadere e stese una mano di "tempera" per fissare il colore. Pochi anni dopo, all'inizio del Novecento, una Commissione ministeriale, a seguito di un sopralluogo nel chiostro, redasse una relazione in cui vennero ampiamente descritte le condizioni degli affreschi. A restaurare venne chiamato questa volta Domenico Fiscali, che si occupò della seconda campata del lato Sud, con l'aiuto del padre Filippo, strappando soltanto una porzione di circa quattro metri. Il "sistema Fiscali" di strappo, consisteva nella rimozione dall'intonaco ammalorato del solo colore che veniva applicato prima su un tessuto di lino e poi su una rete metallica galvanizzata rinforzata con un composto di caseina e gesso (Fig. 2.8). Lo strappo veniva poi fissato a un telaio di legno di essenza resinosa alto alcuni centimetri: la pittura era così distanziata dalla muratura in maniera da consentire la circolazione d'aria. Valutata positivamente la prova, si procedette allo strappo delle scene il cui intonaco, attaccato dall'umidità, aveva reso il colore friabile e polverizzato ma non completamente degradato. Non si hanno notizie di demolizioni di intonaci anche se la scena dell'ultima campata del lato Est è ridotta a un frammento e della "Costruzione della Torre di Babele" non ci rimane che la sinopia. Nei sei anni di lavoro nel chiostro, fino al 1910, Domenico Fiscali strappò l'intera parete della campata con la scena "il Diluvio e l'Ebbrezza di Noè" di Paolo Uccello, la parte centrale del Cristo della "Crocefissione con i santi Domenico e Tommaso" sulla parete di accesso al Refettorio e la lunetta con la "Cacciata dal Paradiso Terrestre" (Rinaldi 1998). Dal 1930 al 1935, Amedeo Benini restaurò buona parte delle scene del lato Est eseguendo la spolveratura della superficie, il consolidamento del colore sollevato e la riadesione dell'intonaco staccato dall'arriccio con mastice di caseina applicato a più riprese e tramite iniezioni, quindi la stuccatura di tutte le cadute e l'integrazione ad acquarello

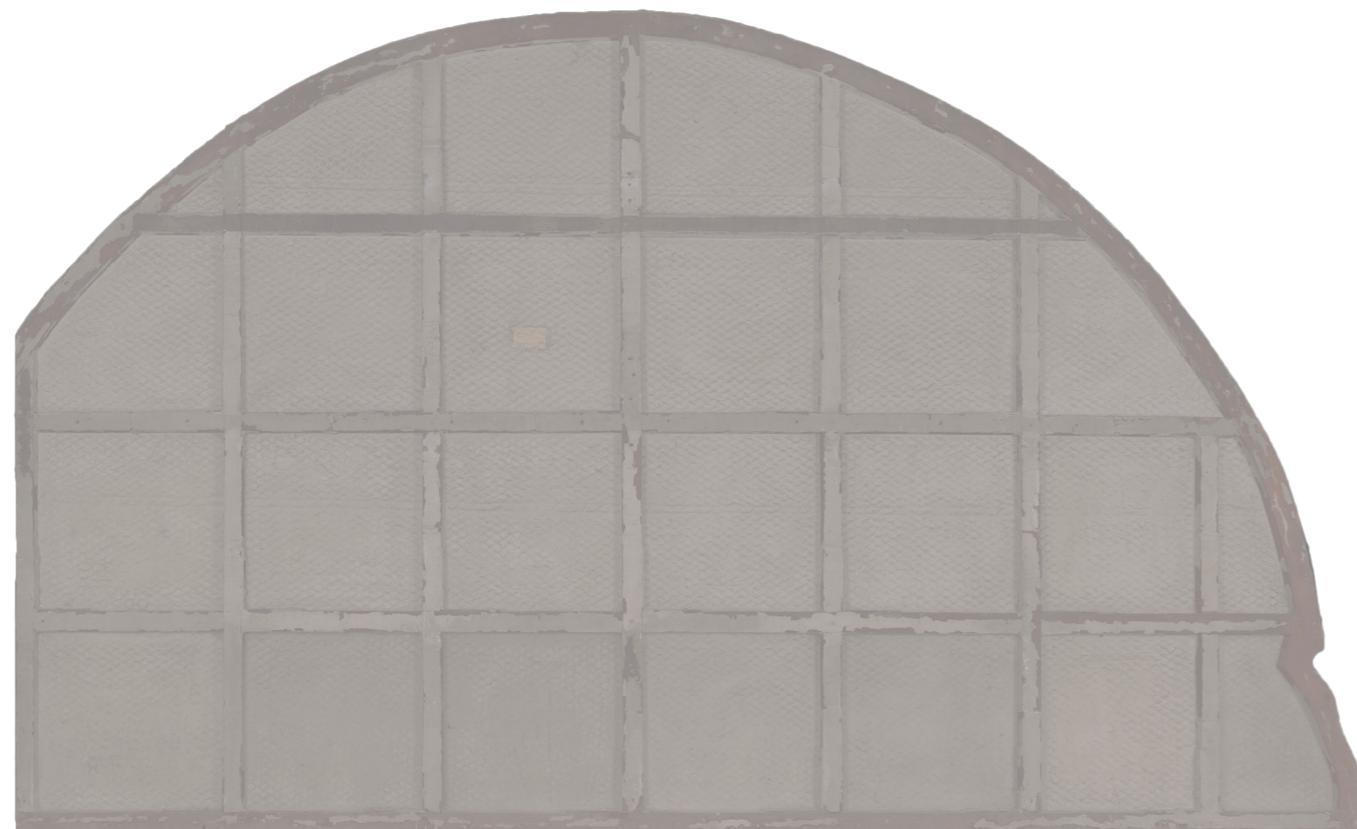


Fig. 2.8 il supporto in rete metallica e gesso utilizzato da D. Fiscali per l'affresco "La cacciata dal Paradiso terrestre" nel lato Est del chiostro Verde.

delle lacune. L'intervento si concluse con l'applicazione di una 'soluzione di uovo' passata su tutto l'affresco per ridare vivacità alla pittura. Tuttavia, varie fotografie eseguite tra il 1939 e il 1950 rivelano il gravissimo degrado che continuava a colpire gli affreschi. Per impedirne l'inevitabile progresso di decadimento, tra il 1939 e il 1940, il nascente Istituto Centrale del Restauro (ICR) di Roma procedette al distacco della scena della "Creazione degli animali e dell'uomo e della Creazione di Eva" e "il Peccato originale" di Paolo Uccello. Poco più tardi, tra il 1952 e il 1954, tutte le rimanenti pitture ancora in situ furono strappate da Leonetto Tintori con la collaborazione dello stesso ICR (Fig. 2.9). Nei primi anni Cinquanta fu necessario procedere a un nuovo trasporto eliminando il caseinato usato dall'ICR che venne sostituito da un composto di Vinavil e carbonato di calcio. Anche il supporto di doppia tela usato dall'Istituto fu sostituito con uno di Masonite. Per le scene dei lati Est Tintori utilizzò dei supporti composti da un unico pannello di Masonite applicato su una struttura reticolare di legno. Questo supporto, che aveva uno spessore

considerabile ed emergeva dal muro fino a cinque centimetri, si adeguava ai massicci telai usati da Fiscali su quel lato del chiostro e mantenuti dal Tintori (Fig 2.10). Tutti i rimanenti affreschi strappati vennero incollati dallo



Fig. 2.9 i restauri del 1954-56, durante le fasi di "foderatura" dei dipinti.

stesso Tintori su supporti in masonite tamburata (Fig. 2.11), per la cui struttura si rimanda al Capitolo 1. In un intervento più tardo, il supporto della scena "L'ebbrezza di Noè" venne sostituito con un pannello in vetroresina, tipologia sandwich, mostrato in Fig 2.12. Il restauro dell'intero ciclo fu concluso nel 1957, anno in cui alcune scene vennero esposte alla mostra del Forte Belvedere sugli affreschi staccati, curata dal Procacci. Colpiti in modo grave dall'alluvione, gli affreschi furono nuovamente restaurati da Leonetto Tintori, Alfio Del Serra e Giuseppe Rosi (Fig 2.13). In Fig 2.14 vengono illustrate schematicamente le campagne di stacco e tipologie di supporti utilizzati nel XX secolo sul lato Est del chiostro Verde. Gli interventi conservativi successivi al 4 novembre 1966 ripercorrono la storia di migliaia di metri quadrati di affreschi che, in un momento di straordinaria emergenza, vennero distaccati dai loro supporti oppure, se già staccati, rimossi e ricoverati nei depositi della Soprintendenza. L'intero ciclo venne ricollocato nel chiostro Verde solamente nel 1983. Con la riapertura del rinnovato Museo comunale di Santa Maria Novella, il Comune promosse l'esposizione permanente "Arte e Storia in Santa Maria Novella" in collaborazione con il Dipartimento di Storia dell'Arte dell'Università di Firenze diretto dal professor Roberto Lunardi e la Soprintendenza: in quell'occasione vennero riscattati ambienti monumentali da anni affittati ai Cavalieri del Santo Sepolcro e all'Associazione

del Calcio Storico e fu resa possibile, oltre al restauro e all'esposizione di oggetti e arredi sacri, la ricollocazione nelle loro sedi originarie di tutte le pitture strappate. Dopo quasi un secolo il ciclo riapparve nella sua integrità. Nel 2005 l'Opificio delle Pietre Dure avviò una completa ricognizione dello stato di conservazione di tutte le scene del chiostro Verde e un programma di monitoraggio dei parametri termo-igrometrici delle superfici dipinte. A seguito di tale monitoraggio fu deciso di procedere con un intervento pilota sulle pitture di una campata del lato Sud mirato alla messa a punto di metodologie guida per il recupero delle decorazioni dell'intero lato (Felici, Pini, e Vigna 2007). Per questo, a partire da luglio 2011, in accordo con il Comune di Firenze e la Soprintendenza Speciale per il Polo Museale fiorentino, l'Opificio ha avviato un intervento d'emergenza volto a mettere in sicurezza le ampie aree del tessuto pittorico interessate da evidenti e gravissimi fenomeni di degrado. In quell'occasione si procedette con locali pre-consolidamenti della pellicola pittorica, fermature localizzate e una velinatura in prossimità delle committiture dei pannelli di masonite, dove si erano verificati distacchi e fratture. Il progressivo peggioramento dello stato conservativo delle pitture del portò poi alla necessità di un restauro complessivo, iniziato alla fine del 2011 grazie ad un contributo ARCUS ed alla convenzione tra il Comune di Firenze e l'Opificio. Il nuovo ciclo di interventi si incentrò sugli otto pannelli delle quattro campate del portico orientale



Fig. 2.10 supporto in masonite semi-tamburata utilizzata da Leonetto Tintori. In fotografia il supporto dell'affresco "La creazione degli animali e la creazione di Adamo", lato Est del chiostro Verde.

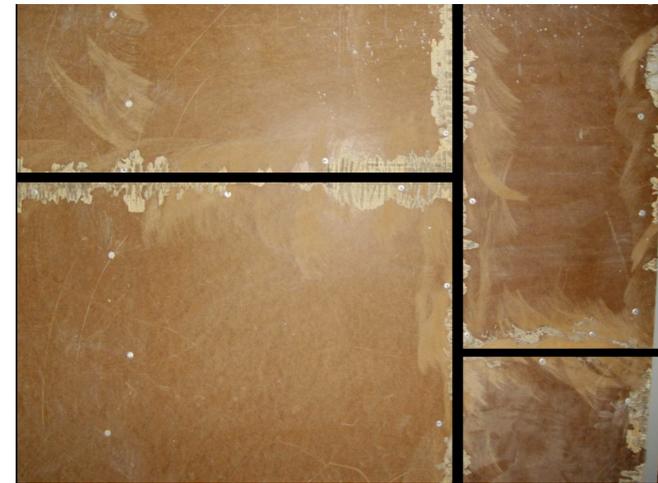


Fig. 2.11 supporto in masonite tamburata utilizzata da Leonetto Tintori per gli affreschi del lato Ovest e Sud del chiostro Verde.

con le scene dipinte da Paolo Uccello. In base alla valutazione dello stato di fu deciso di non sostituire completamente i supporti ma di adeguarli, in modo differenziato secondo le varie tipologie, conservandone soltanto alcuni elementi e di



Fig. 2.12 supporto in vetroresina utilizzato da Leonetto Tintori per l'affresco "L'ebbrezza di Noè".

procedere poi alla loro musealizzazione presso i locali del Museo di Santa Maria Novella (Paolo et al. 2014), (Fig. 2.15). I dipinti staccati da Domenico Fiscali, riportati su un supporto di rete metallica e gesso, seppur realizzati con materiali potenzialmente pericolosi per la conservazione di dipinti murali conservati in ambiente semi confinato, non presentavano evidenze che risultassero essere la causa di ulteriori processi di deterioramento. I principali elementi di criticità furono individuati nel peso (che rappresentava una difficoltà in qualsiasi sistema di ancoraggio), nello spessore

■ Domenico Fiscali: 1907 -1910 | Supporto in rete metallica galvanizzata e gesso

■ Istituto Centrale del Restauro: 1942 | Leonetto Tintori: 1954 – 56
Supporto in masonite semi-tamburata

■ Leonetto Tintori: 1969 | Supporto in vetroresina tipologia 'sandwich'

Paolo Uccello

La creazione degli animali e la creazione di Adamo
Il Paradiso terrestre, la creazione di Eva e il Peccato originale

Maestro fiorentino

La cacciata dal Paradiso terrestre e il lavoro dei progenitori
Il sacrificio di Caino e Abele; Caino uccide Abele

Maestro fiorentino

Storie di Enoch e Lamech, annuncio del diluvio a Noè e costruzione dell'arca
L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia

Paolo Uccello

Il Diluvio universale e la recessione delle acque
L'uscita dall'arca; Il sacrificio di Noè; la benedizione; la vigna e l'Ebbrezza di Noè



Fig. 2.14 campagne di stacco e tipologie di supporti utilizzati nel XX secolo.



Fig. 2.13 Musei di Santa Maria Novella, chiostro Verde, particolare del lato Ovest dopo alluvione del 1966, quando il livello dell'acqua ricoprì la parte bassa degli affreschi per circa 1 m.

(che non consentiva un consono ricollocamento nel contesto architettonico) ed infine nell'assemblaggio fra i vari elementi del supporto, in particolare fra il telaio in legno e la rete

metallica con il gesso o i pannelli in masonite (Bandini et al. 2012). Il supporto semi-tamburato costruito da Leonetto Tintori era invece composto da un pannello di masonite formato da due lastre poste orizzontalmente, irrigidito da una struttura lignea reticolare in legno di abete. La struttura di sostegno consisteva in un'intelaiatura principale, costituita da un telaio perimetrale al quale erano assicurate una traversa orizzontale e due verticali e da un'orditura secondaria di minori dimensioni, composta da regoli orizzontali in cui si incastravano a "mezzo legno" regoli verticali. La struttura lignea era incollata alle lastre di masonite tramite colla di caseina, piccoli chiodi e viti in ottone. In questa fase, sui supporti semi-tamburati del Tintori, fu scelto di rimuovere completamente la struttura reticolare in legno e alleggerire il peso totale dell'intero sistema (Fig. 2.16), (Felici, Vigna, 2021). Le operazioni proseguirono con la laminazione dell'intera superficie del supporto di masonite (composto da più pannelli) con fibra di carbonio e resina epossidica¹. L'intervento era volto ad assicurare una sufficiente continuità fra i vari pannelli evitando la futura formazione di fratture lungo le linee di congiunzione. Per garantire la reversibilità della fibra



Fig.2.15 2011 – 2014 restauro dei dipinti del lato est presso i laboratori di restauro della Fortezza da Basso, fronte e retro 'La creazione di Adamo', Paolo Uccello.

di carbonio dalla masonite, fu scelto un tessuto piuttosto compatto che ne consentisse la rimozione meccanica², inoltre sui pannelli di Masonite venne steso uno strato di *Paraloid B72* come isolante e adesivo termoplastico (Fig. 2.17).

A differenza delle strutture di Tintori, incollate e avvitate alla masonite, il "sistema Fiscali" prevedeva l'impiego di un pesante telaio di legno vincolato alla rete metallica semplicemente tramite legature con filo di ferro nella zona mediana di ogni singolo regolo e perimetralmente lungo tutta la centina. Anche in questo caso fu deciso di rimuovere il telaio tagliando le legature di fil di ferro, (Fig. 2.18) Come vincolo perimetrale continuo fissato sul retro del pannello fu utilizzato uno strip lining in tela di fibra di poliestere. Infine,



Fig.2.16 la rimozione delle strutture di sostegno dei supporti di Tintori.



per colmare le irregolarità della superficie pittorica causate dalla rete metallica, fu interposto, nel retro del dipinto (più precisamente tra la superficie planare del nuovo supporto e l'affresco), senza alcun adesivo uno strato di materiale ad alta adattabilità morfologica: il Poron®, un polimero viscoelastico.

Sui dipinti staccati dal Fiscali, il rinforzo strutturale in fibra di carbonio e resina epossidica non venne reputato necessario perché non furono individuati specifici segni d'alterazione e venne valutata sufficiente la rimozione del telaio in legno (Fig 2.19).

Come vincolo perimetrale continuo fissato sul retro del pannello fu utilizzato uno strip lining in tela di fibra di poliestere. Infine, per colmare le irregolarità della superficie

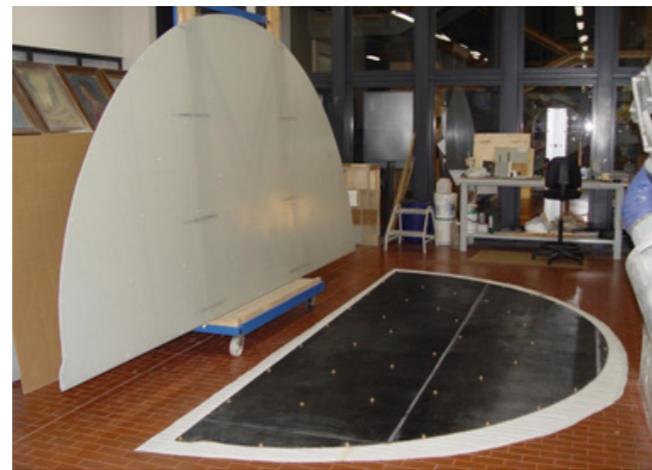


Fig.2.17 Paolo Uccello, La creazione degli animali: foderatura del retro dei pannelli con tessuti in fibra e resina sintetica.



Fig.2.18 Paolo Uccello, "Il Diluvio universale e la recessione delle acque": particolare delle legature tra il telaio ligneo e la rete metallica.

pittorica causate dalla rete metallica, fu interposto, nel retro del dipinto (più precisamente tra la superficie planare del nuovo supporto e l'affresco), senza alcun adesivo, uno strato di materiale ad alta adattabilità morfologica: il Poron®, un polimero viscoelastico. I nuovi supporti dei dipinti vennero infine accoppiati dei pannelli a sandwich in Aerolam® dello spessore di 10 mm per i dipinti con la masonite e di 12 mm per quelli con la rete metallica e il gesso. Per favorire lo scorrimento del margine di tela durante l'ancoraggio, il bordo del pannello in Aerolam® dei dipinti con rete metallica e gesso fu arrotondato tramite

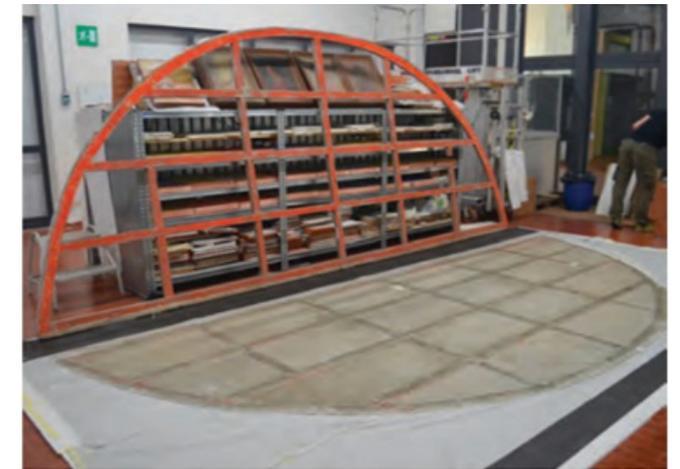


Fig.2.19 Paolo Uccello, "Il Diluvio universale e la recessione delle acque", dopo la rimozione del telaio di D. Fiscali.

una stuccatura con resina epossidica e silice micronizzata. La forma e la dimensione di questi supporti venne ottenuta mediante la giunzione di pannelli con perni in vetroresina. La continuità delle fibre tra i pannelli venne ripristinata, lungo i giunti, tramite applicazione di fasce di fibra di vetro unite con resina epossidica. Il collegamento fra i dipinti e i supporti di Aerolam® fu realizzato mediante punti di ancoraggio composti da basette filettate in ottone, fermate sul retro dei dipinti con resina epossidica, rondelle e piccoli bulloni in acciaio³, inserite nello spessore dell'Aerolam® seguendo una geometria in precedenza studiata e realizzata graficamente



Fig.2.20 panoramica 360° della sala museale con la mostra "A sugo d'erbe e terra verde. Gli affreschi restaurati del Chiostro Verde di Santa Maria Novella", allestita a seguito dei restauri degli affreschi del lato Est del 2014.

tramite Autodesk AutoCAD. Con questo tipo di collegamento, qualora in futuro se ne verifici la necessità, la separazione dei vari elementi di cui la nuova struttura di sostegno è composta (dipinti su rete metallica e gesso o su masonite, supporto a nido d'ape), risulterà estremamente semplificata. Infine, per alleggerire il carico cui sono sottoposte le boccole di ancoraggio, nello spessore del supporto a nido d'ape, lungo tutto il margine inferiore, è stata inserita una barra angolare in alluminio⁴. La demolizione dei telai in legno ha consentito non solo di diminuire lo spessore medio dei pannelli da 45 a 15 mm, ma anche di diminuirne il peso totale di una percentuale variabile dal 30 al 40 % (Felici, Vigna, 2021). Per quanto riguarda il supporto sandwich della scena del "Sacrificio ed Ebbrezza di Noè", esso era composto da un'anima in poliuretano espanso posto tra due strati di fibra di vetro (creati in opera con resina poliesteri e fibra di vetro mat). Durante lo smontaggio del pannello dalla parete del chiostro venne riscontrata una fascia di prolunga al pannello sandwich posta nella parte inferiore del supporto. Tale fascia, presumibilmente applicata nel 1981 (Felici, Vigna, 2021), era composta da un pannello di masonite incollato su una struttura lignea. Visto il notevole spessore e peso della "protesi", fu scelto di sostituirla con un nuovo pannello sottile e leggero composto da una fascia di Aerolam® collegata al supporto in vetroresina. Dopo tali interventi di restauro, i dipinti del lato orientale vennero esposti nell'ex refettorio del convento di Santa Maria Novella, all'interno del percorso museale in cui è stata allestita la mostra "A sugo d'erbe e terra verde. Gli affreschi restaurati del Chiostro Verde di Santa Maria Novella", dove si trovano tutt'ora. La vista generale della sistemazione dei dipinti restaurati è mostrata in Fig. 2.20.



Fig.2.21 deformazioni strutturali dei supporti in masonite presenti nel chiostro Verde.

2.2. Problematiche conservative riscontrate in situ

Dai primi monitoraggi eseguiti nel percorso di tesi è stato possibile osservare un sostanziale peggioramento delle condizioni conservative dei dipinti situati nel chiostro Verde, principalmente a carico dei supporti. Le numerose fessurazioni e fratture rilevate fra i vari elementi di supporto hanno determinato la formazione di distacchi che hanno gravemente compromesso l'integrità della pellicola pittorica. La periodicità dei controlli effettuati ha permesso di notare che i fenomeni di alterazione erano attivi e che nel corso del tempo avevano subito una decisa accelerazione. Le valutazioni sulle cause che hanno originato questi danni hanno messo in evidenza che il principale punto di criticità è rappresentato dall'eterogeneità dei materiali costitutivi dei supporti. Risulta evidente che, trattandosi di materiali diversamente sensibili alla temperatura e all'umidità dell'ambiente – il legno è un materiale igroscopico come pure i materiali da esso derivati ed il gesso; oppure gli elementi metallici hanno coefficienti di dilatazione termica molto diversi dal resto - i valori termo igrometrici dell'ambiente rivestono una particolare importanza e sono determinanti per la conservazione. Si può dunque ragionevolmente supporre che il loro diverso coefficiente di dilatazione termica possa essere una sorgente di danno. Le condizioni ambientali in cui questi dipinti sono conservati, al pari dei chiostri di molte altre chiese fiorentine, non presentano parametri climatici adeguati, tuttavia il recente accentuarsi del degrado in assenza di particolari mutamenti dell'ambiente di conservazione, dimostra che in questo caso vi sia la presenza di altri fattori che ne abbiano favorito il lento decadimento. L'ipotesi più ragionevole sembra riferibile ad una sempre più marcata incapacità di questi materiali e della loro particolare combinazione, di adattarsi



Fig.2.22 cedimento delle viti e delle staffe ad esse sugli affreschi del chiostro Verde.



Fig.2.23 formazione di cretti sulla pellicola pittorica di alcuni affreschi del chiostro Verde.

alle cicliche variazioni ambientali. La graduale perdita di elasticità si è tradotta nel loro progressivo irrigidimento che ha definitivamente compromesso la struttura meccanica del supporto nel suo insieme compromettendone in alcuni casi la stabilità (alcuni casi si deformazioni e sconnessioni sono mostrati in Fig 2.21). Si tratta di una valutazione strutturale che, grazie alle tecnologie adottate nel presente lavoro di tesi, è stato possibile monitorare e quantificare con precisione, sostenendo la ormai maturata constatazione che questi materiali siano giunti in prossimità di un definitivo cedimento della loro resistenza meccanica.

L'elemento più vulnerabile all'interno del sistema è sicuramente l'inadeguatezza del sistema di ancoraggio alla parete utilizzato dal Tintori – ormai quasi 70 anni fa che consiste in semplici viti di ottone filettate (con diametro della

testa di 1.1 cm), inserite con rondelle di 2 cm e tasselli in plastica rigida nella muratura. Per ogni affresco ci sono inoltre delle piccole staffe di metallo (di 1 cm x 0.8 cm) che svolgono sia la funzione di ancoraggio che di sostegno. Questo sistema genera un evidente elemento di discontinuità che favorisce, o quanto meno non evita, la frattura e la separazione fra i vari elementi di cui i supporti sono costituiti. L'ancoraggio può perdere la sua efficacia nel tempo: il cedimento di un tassello nella parete o la perdita di tenuta di una staffa possono comportare forzature e sollecitazioni inadeguate sul supporto che, non avendo più un appoggio equilibrato, si deforma dando luogo a instabilità, disconnessioni fuori piano e deformazioni localizzate (Fig 2.22). Questi fattori portano inevitabilmente a ripercussioni della superficie pittorica dell'opera e, nel peggiore dei casi, possono verificarsi fratture e perdita di colore (Fig. 2.23).

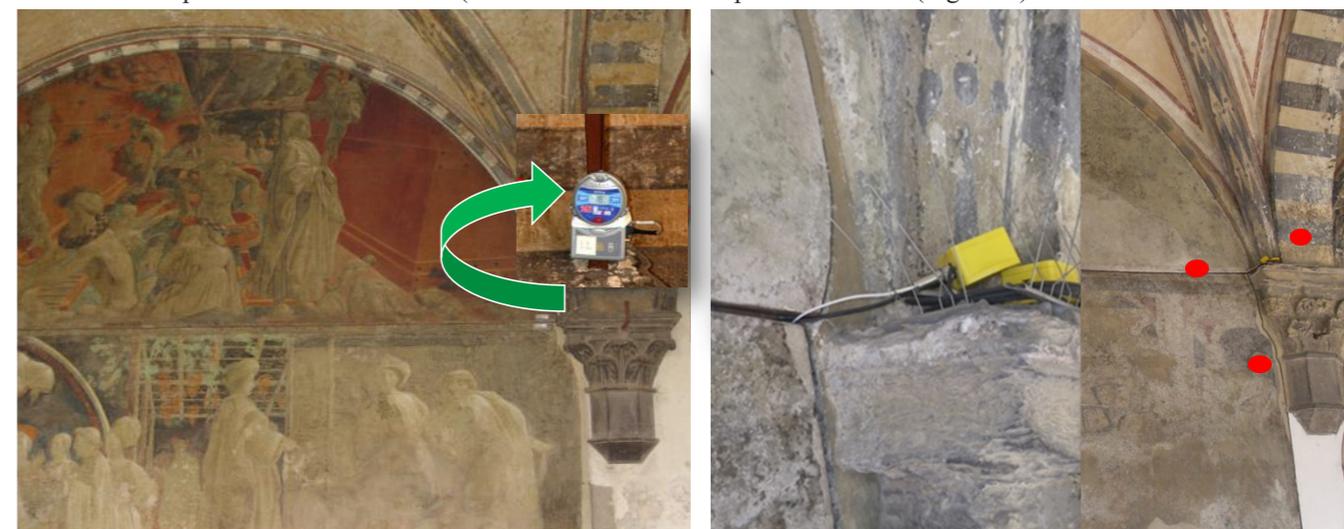


Fig.2.24 monitoraggio dei parametri ambientali (2005 -2006 / 2011- 2016) con sensori Datalog. Misura di: temperatura e umidità relativa ambientali, temperatura superficiale a diverse altezze, temperature umidità sul retro del supporto.

Per comprendere l'influenza dei fattori ambientali sulla stabilità dimensionale dei supporti in masonite, tra il 2005 e il 2015 è stata avviata una campagna di monitoraggio ambientale. I dati sono stati acquisiti nel chiostro Verde di Santa Maria Novella, selezionando pitture applicate su supporto in masonite, vetroresina e rete metallica (quando questi ultimi due erano ancora esposti esternamente, nel lato Est) e per le quali sono state effettuate sia delle misure di temperatura ambientale e umidità relativa attraverso dei *data logger* inseriti nel chiostro, sia delle misure puntuali di umidità, allo scopo di determinare l'assorbimento di umidità dei supporti (Felici et al., 2007), (Ciccione et al., 2005), Fig 2.24. Per quanto riguarda l'indagine puntuale sul supporto sono stati indagati punti specifici mediante l'utilizzo di un apposito strumento, il SUSI⁵, che rileva in maniera non invasiva il contenuto di umidità dei primi strati di intonaco delle pitture dei rispettivi supporti staccati fino a 2-3 cm di profondità, (Olmi et al. 2006), (Bandini et al. 2008), Fig 2.25.

Il monitoraggio del contenuto di umidità sul supporto con lo strumento SUSI nel 2005 (si veda il box plot di Fig 2.26), mostra variazioni nel contenuto di umidità minori per la pittura su supporto semi-tamburato, seguito da tamburato, vetroresina e rete metallica. Inoltre, in relazione alle variazioni dell'umidità relativa dell'ambiente, l'umidità della masonite non mostrava variazioni. Le rilevazioni del contenuto di umidità sul supporto –moisture content (MC)– costituito da doppia tela rinforzata con rete metallica e intonaco effettuato nel 2015 (Fig 2.27), hanno mostrato, come nel rilevamento del 2005, valori di umidità più elevati rispetto ai dipinti applicati sugli altri tipi di supporto e anche

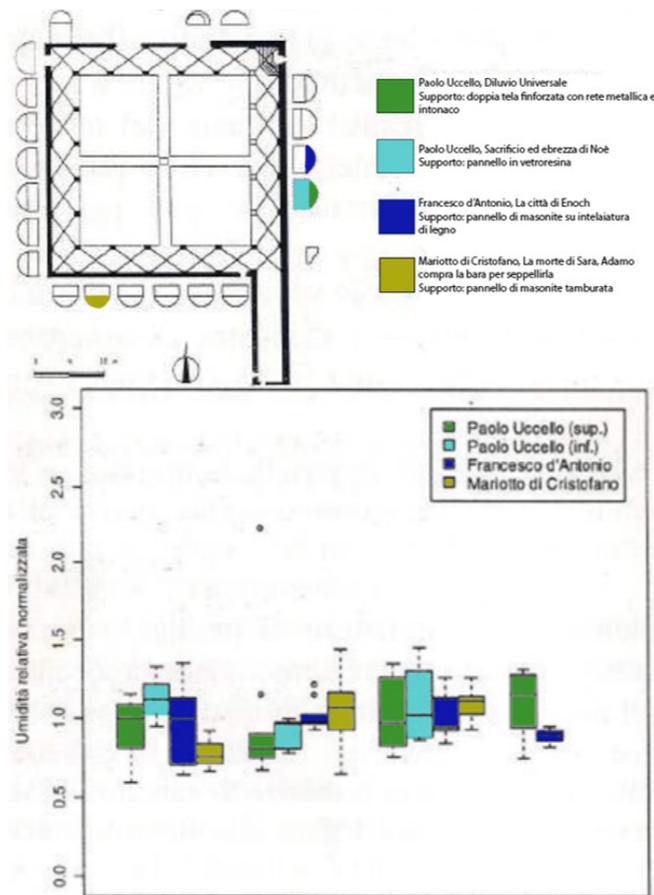


Fig.2.26 sopra: planimetria del chiostro Verde con indicazione delle pitture sulle quali sono stati effettuati i rilevamenti del 2005. Sotto: monitoraggio dell'umidità relativa (MC) normalizzata per quattro pitture selezionate.

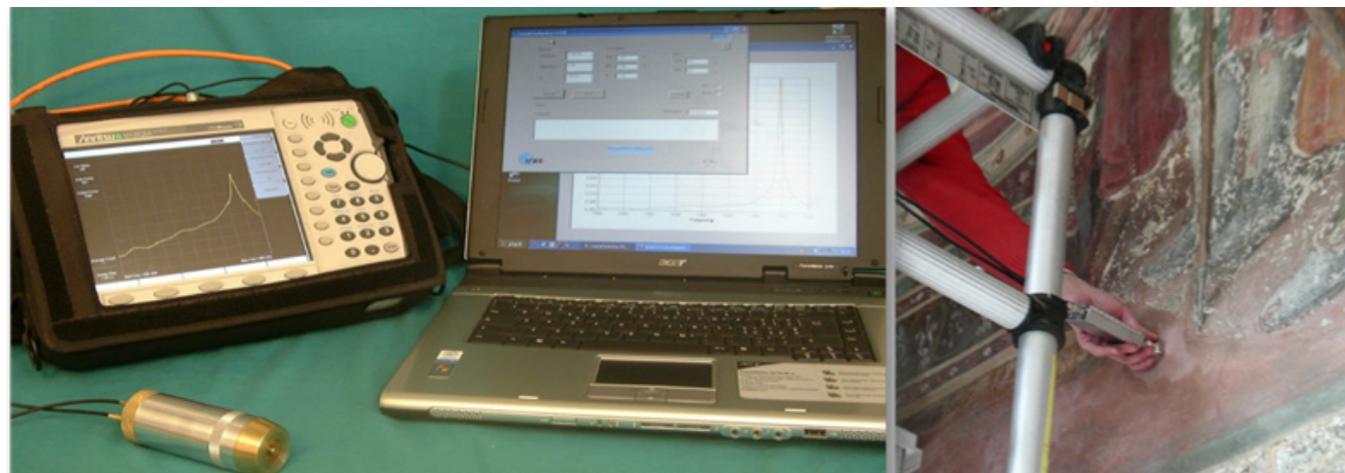


Fig.2.25 monitoraggio dei parametri ambientali (2005 -2006 / 2011- 2016) con spettroscopia a micro onde SUSI. Misura del contenuto di umidità (MC) del supporto.

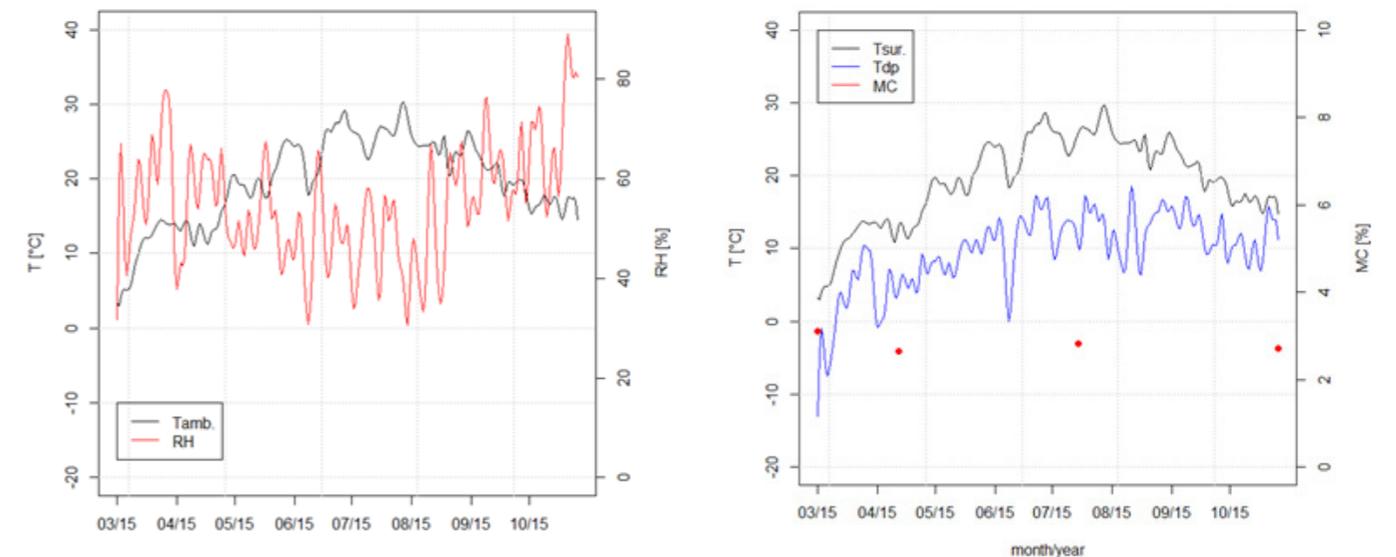


Fig.2.27 risultati del rilevamento termo-igrometrico della campagna eseguita dal 2005 al 2015 sul diluvio universale di Paolo Uccello (supporto in rete metallica e gesso).

la variabilità registrata durante il periodo di osservazione è risultata maggiore. Quanto sopra osservato non era stato riscontrato in termini di temperatura: infatti le rilevazioni della temperatura ambiente (Tamb) e a contatto con il dipinto (Tsup) erano circa della stessa ampiezza. Il calcolo della temperatura di rugiada (Tdp) dalla misura della temperatura e umidità ambiente aveva permesso di valutare se durante il periodo del monitoraggio si erano verificate delle condizioni climatiche che avevano favorito la formazione di condensa sul dipinto. La possibilità del verificarsi di tale fenomeno è stata riscontrata nei periodi autunnali (in particolare nel mese di Ottobre 2015), come mostrato in Fig. 2.27.

Infine, anche se in forma più ridotta ed episodica, si è potuto osservare che alcuni dipinti murali staccati applicati su un



Fig.2.28 imbarcamenti e lesioni di recente formazione (si vedano i bordi bianchi della frattura, segno di recente perdita di colore) rilevati negli affreschi musealizzati.

supporto in masonite, presentano macchie e aloni superficiali e depositi superficiali. I primi potrebbero essere stati provocati dalla migrazione superficiale della lignina, del tannino o di alcuni prodotti della produzione commerciale come olii o fenoli contenuti nella masonite., oppure agli adesivi utilizzati per le tele di supporto che possono essere migrati fino sulla superficie, rendendola più ricettiva ai depositi incoerenti superficiali. Queste forme di alterazione, come la presenza di organismi biodeteriogeni, potrebbero avere una diversa origine. Si può tuttavia ipotizzare che la loro esistenza possa non essere stata ostacolata dalla masonite.

Si può dunque sostenere che le problematiche principali che affliggono i dipinti murali del chiostro Verde, strettamente interconnesse tra di loro, siano le seguenti

- Tipologia e forma dei supporti
- Esposizione ambientale
- Sistema di ancoraggio
- Deformazioni e fratture dei supporti
- Alterazioni cromatiche del colore
- Decoesione e sollevamento della pellicola pittorica
- Presenza di depositi superficiali
- Attacco biologico

Tuttavia, occorre distinguere tra gli affreschi conservati in esterno e quelli musealizzati ormai da circa dieci anni. I primi sono decisamente più esposti ad agenti esterni quali: i) fluttuazioni termo-igrometriche, ii) agenti inquinanti, iii) esposizione agli agenti naturali (vento, sole, fenomeni di condensa). Questi influiscono notevolmente sulle proprietà

fisico-chimiche e meccaniche dei supporti e degli affreschi, considerando specialmente la mancanza di un sistema di ancoraggio adeguato ad una corretta conservazione. Durante il lavoro di tesi è emerso che anche gli affreschi conservati in interno sono affetti da visibili imbarcamenti, deformazioni localizzate e formazioni di fratture della pellicola pittorica (Fig. 2.28)

2.3 Censimento e catalogazione: definizione di una scheda degli affreschi strappati/staccati del chiostro Verde per la gestione dei dati ed il loro utilizzo.

Le operazioni di documentazione del caso di studio, realizzate in occasione del lavoro di tesi, hanno richiesto la compilazione di una scheda di catalogazione per ogni affresco conservato all'interno del chiostro e nella sala museale. La scheda, progettata a priori attraverso un lavoro di individuazione di macro-categorie di dati inerenti alla tematica del progetto, fornisce informazioni su localizzazione, anni di realizzazione, ultimi restauri, stato di conservazione, eventuali vincoli di tutela, bibliografia e contiene il campo libero "osservazioni".

La verifica dello stato di conservazione delle pitture murali strappate/staccate del chiostro è stata effettuata tra Marzo 2021 e Ottobre 2023. L'analisi visiva delle pitture, congiunta alle analisi svolte con le varie metodologie di rilievo digitale riportate nel capitolo successivo, hanno permesso di ottenere un quadro dettagliato delle condizioni conservative dell'intero ciclo. Le informazioni e i dati rilevati sono stati ordinati all'interno di schede descrittive, compilate per ciascuna campata, contenente due distinti registri sovrapposti (affresco superiore e inferiore). Le schede integrano i dati già esistenti in letteratura (Frosinini 2021), («Catalogo Generale Dei Beni Culturali», s.d.) in cui, nel primo caso, la ricognizione dello stato conservativo era stata effettuata dal Febbraio all'Aprile 2005, mentre le schede dell'ICCD risultano aggiornate al 2022, (Fig. 2.29).

Lo stesso modello di scheda è stato utilizzato per tutti gli affreschi, consentendo di creare un database con riferimenti comuni utili anche per effettuare analisi a posteriori. Tutte le informazioni raccolte sono state catalogate secondo determinate categorie, con l'intento di organizzare in modo organico e univoco tutte le informazioni principali riguardanti

gli affreschi, sia quelle di carattere generale, sia quelle emerse durante tale lavoro di tesi. Un ulteriore possibile *output* è quello di avvalersi di applicativi GIS (*Geographic Information System*) che permettono di ottenere rappresentazioni cartografiche con layer contenenti i dati di diversa natura (testi, immagini, rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali) visualizzati graficamente (Cottini 2023), (Sala 2017), (Bertocci et al., 2020), dove poter inserire tutte le informazioni inerenti alla schedatura. Le schede di catalogazione, realizzate tramite il software *Clarif FileMaker Pro*, possono infatti essere esportate in formato .csv (*comma-separated values*), ovvero un formato basato su file di testo, utilizzato per l'importazione ed esportazione da *database* di una tabella di dati. Il file .csv contiene tutte le informazioni raccolte, espresse come stringhe di testo, o valori, separati da virgole. Tale file può essere importato in QGIS, un Sistema di Informazione Geografica costruito su *Software Libero e Open Source (FOSS)*. Il file viene importato come *layer* testo delimitato, andando poi a costituire uno *shapefile* (.shp) all'interno di QGIS. Dalle schede consultabili nel Catalogo generale dei Beni Culturali (ICCD) è possibile inoltre visualizzare i file .RDF suddivisi in diversi label. Seguendo la metodologia proposta da Nishanbaev (Nishanbaev et al, 2021), è possibile convertire i dati geospaziali relativi ai Beni Culturali in dati .RDF. Questo permette di convertire anche le informazioni di tipo spazio-temporale utilizzabili per costruire applicazioni web semantiche geospaziali (Cottini 2023). Ai fini della presente ricerca, la scheda è stata ampliata con ulteriori campi che soddisfacessero gli obiettivi specifici del progetto, quali i risultati ottenuti dall'approccio multi-analitico effettuato nel complesso di Santa Maria Novella. In particolare, come illustrato nel paragrafo 5.4, la possibilità di esportare i dati in vari formati, sia sotto forma di scheda grafica in formato PDF, sia sotto forma di tabelle, nelle estensioni XML, XLSX e CSV, ha permesso di selezionare e ordinare i campi da esportare in base alle diverse esigenze.

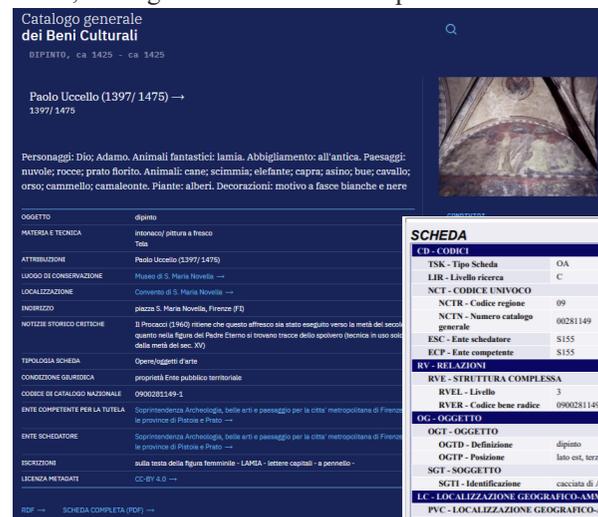
comprendere come rendere omogenei ed implementabili i vari campi in modo che le 'schede di catalogazione' potessero essere utilizzate per tutti gli affreschi. Un altro problema affrontato ha riguardato la possibile interoperabilità del database in maniera che le schedature con i relativi contenuti potessero eventualmente venire reimpiegate, così da rendere possibile l'estrazione dei dati anche per futuri progetti e/o integrazioni di nuovi dati. Le schede sono state create e compilate con Clarif FileMaker Pro, un *software DBMS (DataBase Management System)* – ovvero di gestione database, che incorpora database, interfaccia e strumenti di programmazione. Non è un programma con licenza gratuita, né open-source. Può importare dati da altre applicazioni tramite SQL⁶, importare ed esportare dati in ASCII⁷ o XML⁸. Di seguito la descrizione dei contenuti registrati nelle singole macro-categorie (Fig. 2.30).

- Contesto generale: contiene informazioni relative all'operatore, ovvero il responsabile dei dati registrati, la data di compilazione, il codice identificativo del singolo affresco riportato nel Catalogo generale dei Beni Culturali (ICCD), la denominazione della struttura, la posizione attuale, l'attuale ente di tutela, il contesto ambientale.

- Localizzazione: contiene informazioni toponomastiche specifiche su stato, regione e città in cui si trova l'affresco. Queste ultime sono fondamentali per gli output legati alla georeferenziazione su GIS.

- Caratteristiche storiche: contiene dati riguardanti tutte le vicende conservative legati agli affreschi, divise tra registro superiore e inferiore poiché le vicende conservative sono diverse, soprattutto per quando riguarda gli affreschi del lato Est del chiostro che hanno subito modifiche al supporto. Segue anche il campo della stratigrafia complessiva, che tiene in considerazione l'intero sistema supporto-affresco e la tipologia di ancoraggio alla muratura, diversificato per gli affreschi tutt'ora in situ e quelli musealizzati che non sono più ancorati alla muratura ma posizionati su dei pannelli espositivi. I campi comprendono quindi i restauri documentati sia dell'affresco che del supporto, dal 1850 fino ad oggi. Vi è poi il campo di testo "bibliografia" nel quale si inseriscono la bibliografia e la sitografia, in formato APA - è infatti fondamentale che tutte le informazioni di carattere storico siano verificate.

- Risultati del protocollo metodologico, ovvero del rilievo architettonico multi-scala e multi-sensore. I risultati riportano i disegni 3D tecnici realizzati a partire dalle nuvole di punti laser scanner, con la generazione di orto-immagini e *slice*, il fotopiano ottenuto dal rilievo fotogrammetrico, i modelli



SCHEDA		CD - CODICI
TSK - Tipo Scheda	OA	
LIR - Livello ricerca	C	
NCT - CODICE UNIVOCO		09
NCTR - Codice regione		09
NCTR - Numero catalogo generale		00281149
ESC - Ente schedatore		S155
ECP - Ente competente		S155
RIVESTIMENTI		
RVE - STRUTTURA COMPLESSA		
RVEL - Livello		3
RVER - Codice bene radice		0900281149
OG - OGGETTO		
OGT - OGGETTO		dipinto
OGTD - Definizione		lato est, terza campata da destra, in alto
OGTP - Posizione		lato est, terza campata da destra, in alto
SGT - SOGGETTO		
SGTI - Identificazione		cacciata di Adamo ed Eva dal paradiso terrestre
LC - LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICO-AMMINISTRATIVA		
PVC - LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICO-AMMINISTRATIVA ATTUALE		
PVCR - Stato		Italia
PVCR - Regione		Toscana
PVCP - Provincia		FI
PVCC - Comune		Firenze
LDC - COLLOCAZIONE SPECIFICA		
LDC1 - Tipologia		convento
LDCQ - Qualificazione		domenicano
LDCN - Denominazione attuale		Convento di S. Maria Novella
LDC1C - Complesso di appartenenza		Chiesa e Convento di S. Maria Novella
LDCU - Indirizzo		piazza S. Maria Novella
LDCM - Denominazione casella		Museo di S. Maria Novella
DI - CRONOLOGIA		
DI2 - CRONOLOGIA GENERICA		
DI2G - Secolo		sec. XV
DI2S - Frazione di secolo		secondo quarto
DI3 - CRONOLOGIA SPECIFICA		
DI3A - Da		1425
DI3F - A		1449

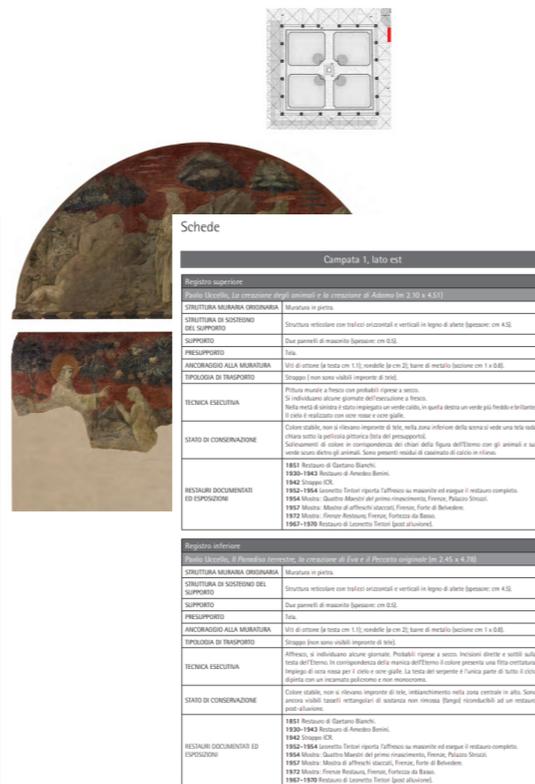


Fig. 2.29 schedature già esistenti in letteratura. A sinistra le schede del Catalogo generale dei Beni Culturali (ICCD), a destra schedatura effettuata da Andrea Vigna in "Frosinini C., 2021".

di elevazione realizzati per ciascuna campata e inserendo la relativa scala di deformazione (in metri). Le sezioni ortogonali alla superficie dell'affresco, realizzate a partire dalla chiave di volta di ogni singola campata ed infine l'ortomosaico ottenuto dal rilievo termografico nell'infrarosso.

• Alla luce dei risultati ottenuti dal rilievo digitale integrato è stato creato un campo relativo alla congruenza o meno con la bibliografia esistente e un elenco delle principali fonti di degrado che interessano supporto e affresco, dalle quali è stata definita una scala di emergenza del rischio, basata sul manuale "Risk Manual, ABC Method", (Risk Manual, ABC Method, 2016), trattato nel paragrafo successivo.

In conclusione, i prodotti ottenuti nella fase di raccolta dati sono i seguenti:

- Un database contenente informazioni espresse in forma di testi, numeri, liste di valori — esportabili ad esempio in formato .fmp12, .xlsx, .htm, .csv;
- Modelli 3D di nuvole di punti riferiti ai diversi monitoraggio (tre nello specifico) — solitamente salvati

in formato .ptx, .pts, .e57;

- Modelli 3D di mesh texturizzati sia dei singoli affreschi sia del complesso architettonico in cui essi sono inseriti, ovvero le porzioni del chiostro e della sala museale in cui sono conservati alcuni di essi — solitamente salvati in formato .obj, .ply, .fbx;
- Foto di contesto, rappresentazioni grafiche e risultati diagnostici (diagnostica per immagini, ecc.) — salvate in formato .jpg formato .jpg, png e tiff.

2.4 Monitoraggio e gestione del rischio

Alla luce di tutte le problematiche riscontrate nel paragrafo precedente, si è reso necessario definire un protocollo metodologico basato sul monitoraggio stagionale dei dipinti murali con l'obiettivo di valutarne i rischi e i processi di deterioramento, partendo dal caso pilota del ciclo di pitture presenti nel chiostro Verde. I modelli 3D nel campo Beni Culturali possono essere utilizzati per vari scopi, tra cui:

lo studio, la didattica, la documentazione/catalogazione, la conservazione (tenere traccia della situazione prima di un intervento di restauro), la fruizione (musei virtuali, ricomposizione degli elementi dispersi di un intero), il restauro (studio delle integrazioni e riferimento per i dati di altre indagini diagnostiche), la realizzazione di copie e così via. Ad oggi sono stati sviluppati diversi sistemi per il rilievo 3D di un oggetto, basati su tecnologie e principi fisici assai differenti. In tale studio, la creazione di modelli digitali tramite tecniche multi-sensore basate su tecnologie totalmente non distruttive -Non Destructive Techniques- (NDTs) si è dimostrata come la scelta metodologica più appropriata per lo studio e il controllo dello stato di conservazione dei supporti e degli affreschi strappati e staccati nel chiostro Verde di Santa Maria Novella. La conservazione preventiva è definita dal Centro internazionale di studi per la conservazione ed il restauro dei beni culturali (ICCROM) come «l'insieme delle misure e delle azioni tese a evitare o ridurre al minimo futuri

deterioramenti o perdite. Esse sono condotte sull'ambiente e nel contesto del bene, generalmente un insieme di beni, a prescindere dalle loro condizioni o epoca. Tali misure ed azioni sono indirette, non interferiscono con i materiali e la struttura dei beni e non ne modificano l'aspetto», (ICCROM, 2008). Dal 2005 al 2012, l'ICCROM ha collaborato con partner internazionali per avviare un cambiamento di paradigma dalla tradizionale conservazione preventiva a un approccio basato sulla gestione del rischio. Il metodo efficace e sistematico per gestire tutti i rischi che interessano il Patrimonio Culturale, dovuti a fattori cumulativi o a eventi catastrofici, incorpora due innovazioni: la considerazione del valore e del significato del patrimonio culturale nel processo decisionale e la quantificazione dei vari rischi per consentire il confronto e la definizione delle priorità. Dal 2017, il metodo è stato reso disponibile gratuitamente in due risorse online: una guida, che introduce il metodo (principi e fasi) con esempi illustrati (*A guide to risk management of Cultural*

The figure shows four sheets of a cataloging form for frescoes, labeled FOGLIO 1, FOGLIO 2, FOGLIO 3, and FOGLIO 4. Each sheet contains various data entry fields and checkboxes for recording general information, stratigraphy, and methodological results.

- FOGLIO 1:** A-DATI GENERALI (Operator, Date), LOCALIZZAZIONE (Nazione, Regione NUTS2, Città, Complesso architettonico, Area, Ente competente per la tutela), REGISTRO SUPERIORE (Dimensioni, Restauri documentati, Restauro supporto, Supporto originale, Nuovo supporto), REGISTRO INFERIORE (Dimensioni, Restauri documentati, Restauro supporto, Supporto Originale, Nuovo supporto).
- FOGLIO 2:** A-DATI GENERALI, REGISTRO SUPERIORE (Stratigrafia complessiva), REGISTRO INFERIORE (Stratigrafia complessiva), B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO (FIL DI FERRO, FOTOPIANO).
- FOGLIO 3:** B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO (LASER SCANNER (DEM), LASER SCANNER (sezioni)).
- FOGLIO 4:** B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO (TERMOGRAFIA IR, Osservazioni, BIBLIOGRAFIA).

Fig.2.30 struttura delle schede di catalogazione elaborate per gli affreschi del chiostro Verde. 1.1: dati generale, inquadramento planimetrico, foto generale. 1.2: dati di inquadramento storico registro superiore. 1.3: dati di inquadramento storico registro inferiore. 2.1: stratigrafia e ancoraggio registro superiore. 2.2 stratigrafia e ancoraggio registro inferiore. 2.3: risultati del protocollo metodologico: fili di ferro e fotopiano. 3.3 risultati del protocollo metodologico: dem e sezioni laser scanner T0, T1 e T2. 4.1: risultati del protocollo metodologico: termografia IR e struttura telaio interno. 4.2: risultati del protocollo metodologico stato di conservazione. e valutazione qualitativa della magnitudo del rischio; 4.3 Osservazioni. 4.4 Bibliografia.

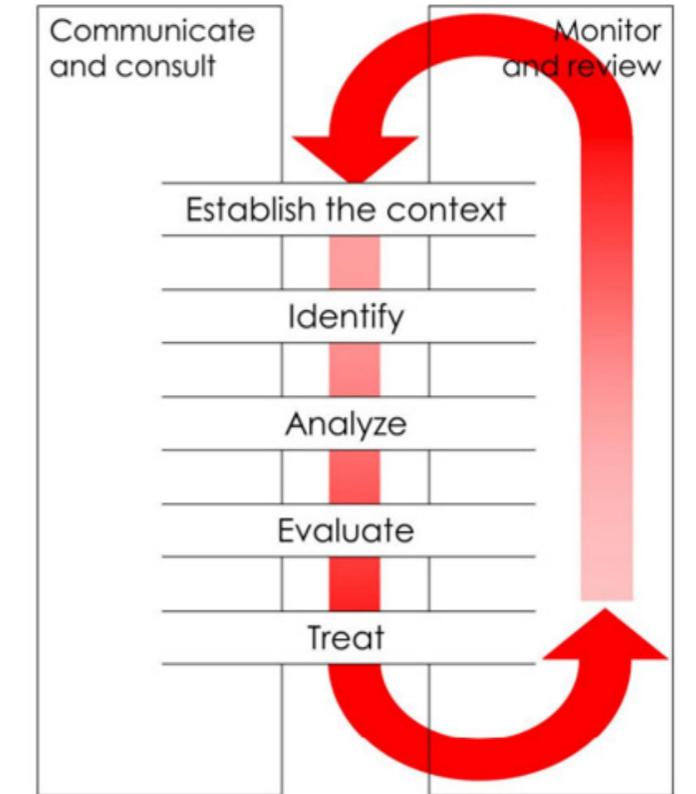


Fig.2.31 il ciclo di gestione del rischio tratto da "ABC Method, A risk management approach to the preservation of Cultural Heritage, ICCROM (2016)"

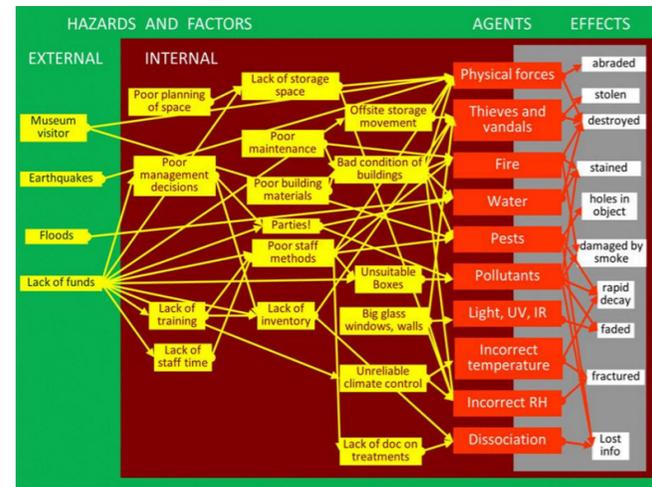


Fig. 2.32 collegamenti in una rete di cause ed effetti che inizia con i pericoli e termina con gli effetti sul bene. Tratto da "ABC Method, A risk management approach to the preservation of Cultural Heritage, ICCROM (2016)".

Heritage, 2016) e il Metodo ABC, ovvero un manuale per l'applicazione del metodo in vari contesti (Risk Manual, ABC Method, 2016). Facendo riferimento al manuale, esso è strutturato attorno a un ciclo di gestione del rischio che ad oggi fa parte della norma ISO 31000:2009. Tale ciclo è costituito da cinque fasi sequenziali e da due attività continue, illustrate in Fig. 2.31.

Nello stesso manuale vengono individuati i fattori di rischio (esterni ed interni), le cause (agenti) e gli effetti (Fig. 2.32) uniti da frecce, che connettono i diversi fattori causa-effetto. Le frecce corrono tutte da sinistra a destra, da pericoli esterni o interni, attraverso le carenze di risorse, di mitigazione, gli agenti di deterioramento, per finire con gli effetti negativi sul bene culturale. Ogni percorso, dal suo inizio a sinistra alla fine a destra, costituisce uno scenario di rischio.

Partendo dai requisiti dettati dalle direttive dell'ICCROM, nell'ambito del chiostro Verde, le metodologie di rilievo utilizzate sono state identificate come metodi indispensabili per la costruzione dell'apparato critico dello stato di conservazione degli affreschi, in grado di bilanciare la conservazione con la sostenibilità, la riduzione dei rischi e il loro monitoraggio, le richieste degli utenti e la responsabilità pubblica a cui verrà dunque fornito uno strumento di supporto decisionale, nella forma di un sistema di monitoraggio che consenta al responsabile del singolo bene di poter attivare le necessarie procedure operative qualora sia necessario. Facendo riferimento al ciclo di gestione del rischio di Fig. 2.31, il monitoraggio periodico e l'approccio multi-scala e multi-sensore adottato in questa tesi sarà in grado di coprire

le prime 4 fasi sequenziali e le due attività continue, ovvero:

- Stabilire il contesto: il rilievo a larga scala permetterà di definire il contesto architettonico nel quale gli affreschi sono inseriti, raccogliere e comprendere le informazioni rilevanti e stabilire gli obiettivi e i criteri di ricerca;
- Identificazione dei rischi: è il processo che porta all'individuazione di rischi specifici che possono poi essere analizzati tramite strumenti e strategie appropriate (rilievo media scala e di dettaglio). Il secondo compito da adottare è l'effettuazione periodica di rilievi e sopralluoghi, con un'attenta documentazione fotografica. Questo approccio permette di identificare i rischi specifici e nominarli.
- Analizzare il rischio: è il processo che porta alla misurazione e quantificazione di ogni rischio specifico identificato. In questa fase è possibile anche rivedere e perfezionare le analisi;
- Valutare il rischio: è il processo che porta alla valutazione di ogni rischio specifico rispetto ad altri rischi o ad alcuni criteri. È necessario dunque valutare la sensibilità, l'incertezza, i vincoli e le opportunità.

Il trattamento del rischio è l'attuazione della riduzione del rischio, che verrà esercitata da un ente esterno, in questo caso dai restauratori. Il ciclo di gestione del rischio è così stato completato.

Ma come si può misurare il rischio? Le metriche sono lo strumento per determinare se un rischio è maggiore o minore di un altro (Risk Manual, ABC Method, 2016). Nell'elenco di metriche del rischio provenienti da vari settori,

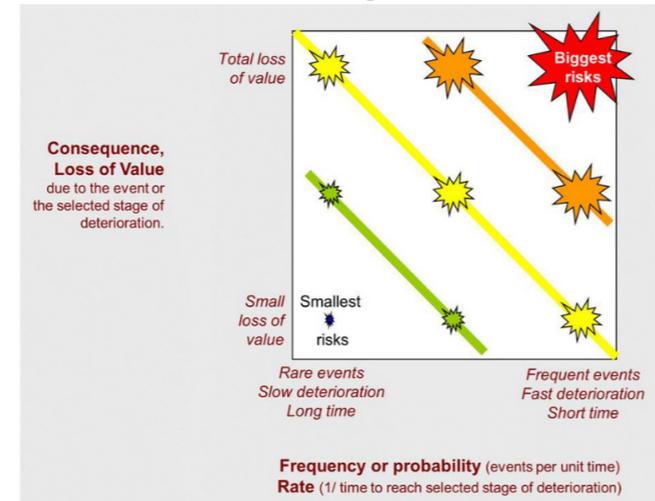


Fig. 2.33 grafico perdita di valore contro frequenza o tasso percentuale. ©Government of Canada, Canadian Conservation Institute. CCI 96638-0001, Tratto da Risk Manual, ABC Method, 2016.

la prima rilevata dalla Society for Risk Analysis (2015) è: «La combinazione di probabilità e magnitudo/severità delle conseguenze». La Figura 2.33 è la mappa di tali combinazioni. Per quanto riguarda il rischio per i beni culturali, il rischio è definito come «la perdita frazionaria di valore prevista per il bene del patrimonio per unità di tempo», ad esempio la perdita di valore in % per secolo. L'asse delle ordinate di Figura 2.29 misura la gravità dell'evento ed è spesso chiamato «Consequence» o «Impact». Nel metodo ABC è chiamato «Loss of value», ovvero perdita di valore. L'asse delle ascisse misura invece la frequenza con cui si prevede che l'evento si verifichi ed è spesso chiamato «Probability» dell'evento: si chiama «Frequency» per gli eventi e «Rate» per i processi cumulativi. Nel metodo ABC, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate «magnitudo del rischio», abbreviata in MR. In tutti i campi della valutazione del rischio, il diagramma di base per il confronto dei rischi utilizza due assi, illustrati nella Figura 2.34.

Magnitude of Risk	General Implications of the Range	Colour
15 – 13½	Catastrophic Priority. All or most of the asset value is likely to be lost in a few years or less. Possible only for an asset recently placed in a high hazard zone, such as a very badly designed facility in the wrong place or an asset facing a known impending disaster, such as active hostilities or hurricanes.	red
13 – 11½	Extreme Priority. Significant damage to all the heritage asset or total loss of a significant fraction of the heritage asset is possible in a decade or less. These scores typically arise from wide-scale fire and theft risks or very high rates of damage in a new, badly designed building from bright light, UV, or damp.	amber
11 – 9½	High Priority. Significant loss of value to a small fraction of the heritage asset is possible in a decade, or significant loss to most of the collection is possible in a century. These scores are common in organizations where preventive conservation has never been a priority or where a few precious items are exposed to easy theft.	yellow
9 – 7½	Medium Priority. Moderate damage or likelihood of loss over many decades. Or significant loss over most of the heritage asset that is expected to take many millennia. These scores apply to the ongoing improvements even conscientious organizations must make after addressing all of the higher risks.	green
7 – 5½	Negligible Priority. This level of risk means one expects tiny or minuscule damage to occur to a tiny fraction of the heritage asset value in centuries. If one believes this to be a priority risk, perhaps the relative value of the affected items has not been scored correctly.	blue

Fig. 2.34 scala di magnitudo del rischio con implicazioni, tratto da "ABC Method, A risk management approach to the preservation of Cultural Heritage, ICCROM (2016)".

Note

¹ Resina epossidica a bassa viscosità Araldite LR 285 con induritore LH 286 e una fibra di carbonio bilanciata con trama twill da 285 g/mq. Prima dell'adesione della fibra di carbonio, il retro della masonite è stato impregnato con uno strato della stessa resina allo scopo di ridurre l'assorbimento.

² Prima di scegliere la grammatura della fibra e il sistema di applicazione, sono stati effettuati dei test di rimozione per trazione dai restauratori dell'OPD. I test hanno dimostrato che la laminazione risultava reversibile meccanicamente, senza apporto di calore o di solventi (Felici, Vigna, 2021)

³ Sono stati impiegati bulloni in acciaio inox M5 e, per limitare al massimo lo spessore totale del supporto, sottili rondelle con depressione centrale, (Felici, Vigna, 2021)

⁴ La barra in lega di alluminio, con sezione a L, di 15 x 15 mm e spessore di 2 mm è stata inserita (solamente nei supporti degli strappi di Tintori) in uno scasso eseguito nello spessore del bordo inferiore dell'Aerolam® e incollata con resina epossidica Epo 121®, (Felici, Vigna, 2021)

⁵ Il SUSI è un sistema brevettato (Brevetto CNR n. 1626 - FI 2004A000187) che consente di misurare caratteristiche dielettriche medie di un materiale composito e di correlare tali caratteristiche alla quantità di acqua in esso presente e di rivelare, in modo semi-quantitativo, la presenza di elettroliti. Il sistema di misura consiste di un sensore a microonde non invasivo operante nell'intervallo di frequenze 1.1-1.4GHz, alimentato da uno strumento general purpose (VNA, analizzatore di reti) controllato da remoto mediante PC portatile attraverso un'interfaccia standard per strumentazione scientifica (GPIB). I dati acquisiti sono poi elaborati mediante un codice numerico che estrae i parametri di interesse, legati al contenuto di umidità e alla concentrazione di sali.

⁶ Structured Query Language, linguaggio standardizzato per database basati sul modello relazionale.

⁷ American Standard Code for Information Interchange. È un computer standard di codifica dei caratteri apparso negli anni '60. È lo standard di codifica dei caratteri più influente fino ad oggi. ASCII definisce codici di 7 bit, comprendenti i numeri arabi da 0 a 9, le 26 lettere dell'alfabeto latino in minuscolo e maiuscolo, i simboli matematici e di punteggiatura (Wikipedia.org, voce "ASCII")

⁸ eXtensible Markup Language. È un metalinguaggio per la definizione di linguaggi di markup, ovvero un linguaggio basato su un meccanismo sintattico che consente di definire e controllare il significato degli elementi contenuti in un documento o in un testo. Il nome indica che si tratta di un linguaggio estendibile, in quanto permette di creare tag personalizzati e costituisce il tentativo di produrre una versione semplificata dello Standard Generalized Markup Language (SGML), che consente di definire nuovi linguaggi di markup (Wikipedia.org, voce "XML").

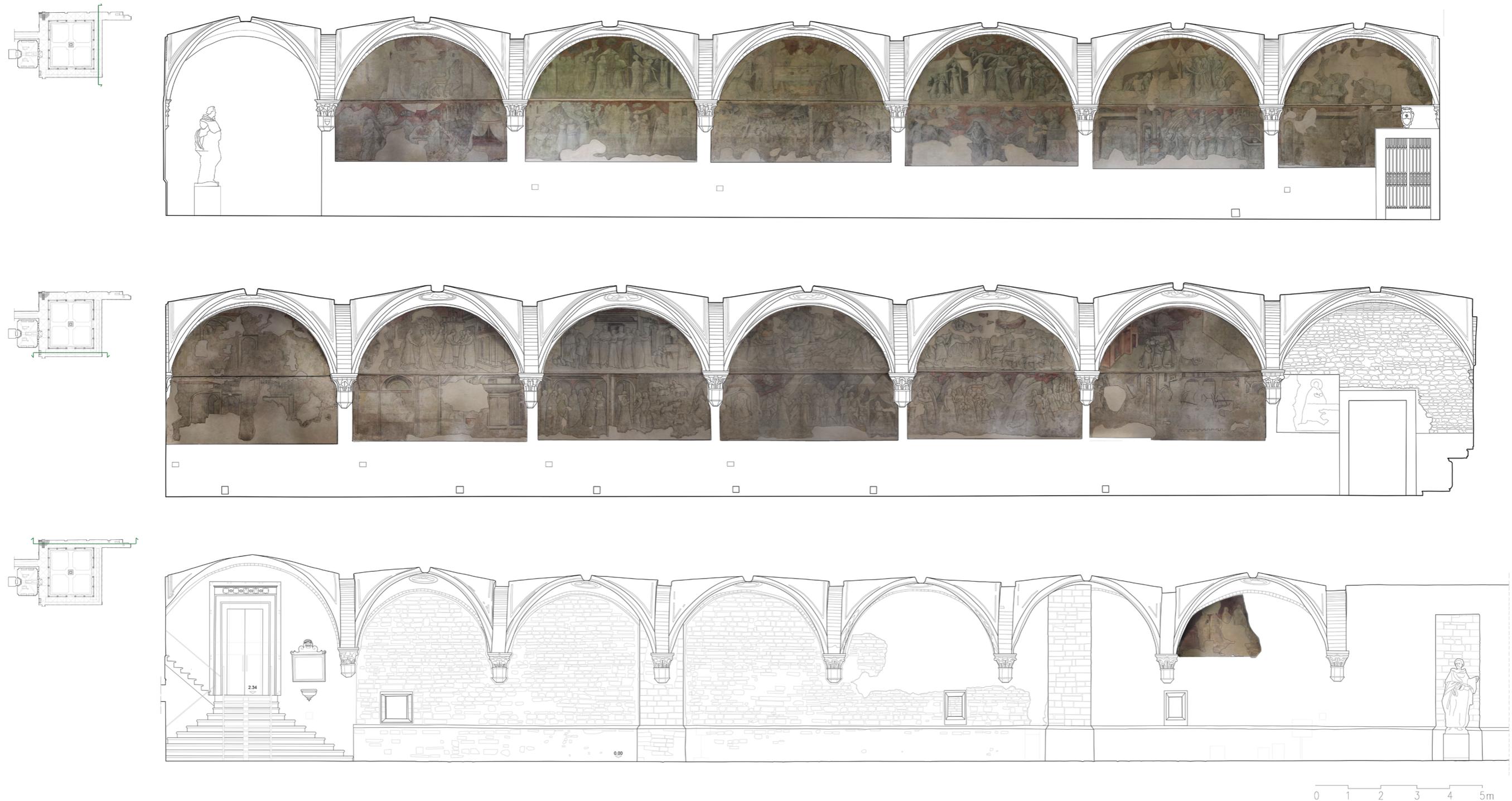


Fig.2.35 dall'alto verso il basso: prospetto lato Sud, Ovest ed Est del chiostro Verde, nella basilica di Santa Maria Novella, con evidenziati i dipinti murali conservati in situ.



CAPITOLO 3

SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA DI RILIEVO DIGITALE INTEGRATO
MULTI-SCALA E MULTI-SENSORE PER IL CONTROLLO DELLO STATO DI
CONSERVAZIONE DEI SUPPORTI DI DIPINTI MURALI STACCATI

CAPITOLO 3

SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA DI RILIEVO DIGITALE INTEGRATO MULTI-SCALA E MULTI-SENSORE PER IL CONTROLLO DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DEI SUPPORTI DI DIPINTI MURALI STACCATI

In questo capitolo si trattano le metodologie impiegate per la sperimentazione partendo da alcune esperienze nel settore dell'architettura riguardanti l'utilizzo dei vari sistemi di rilievo digitale su superfici dipinte. In tale contesto si inserisce lo studio dei supporti e degli affreschi strappati e staccati e il loro monitoraggio, soprattutto in termini di variazioni strutturali. Partendo dai principi stabiliti dall'ICCROM riguardo la conservazione preventiva e gestione del rischio, l'impiego di metodologie appropriate non invasive e non distruttive, con particolare riferimento alle tecnologie digitali (quali la rilevazione laser 3D utilizzata a larga e piccola scala, la fotogrammetria *Structure from Motion* - SfM, il rilievo topografico e quello nell'infrarosso termico) sono risultati quali momenti imprescindibili per l'integrazione sulle analisi dello stato di conservazione degli affreschi e la definizione di un protocollo analitico di riferimento. Verranno dunque analizzate le varie metodologie selezionate a seconda dei vari obiettivi e della loro interoperabilità, considerando inoltre la scala di restituzione, le dimensioni dell'oggetto, l'accuratezza richiesta e la fattibilità delle misure in situ.

3.1 I criteri della scelta metodologica

Partendo dai requisiti dettati dalle direttive dell'ICCROM, nell'ambito del chiostro Verde, le metodologie di rilievo utilizzate sono state identificate come metodi indispensabili per la costruzione dell'apparato critico dello stato di conservazione degli affreschi, in grado di definire il contesto architettonico nel quale gli affreschi sono inseriti, valutarne i rischi, monitorarli, analizzare le cause di alcune fonti degrado e gli effetti che hanno prodotto, con l'obiettivo finale di definire un adeguato protocollo conservativo adatto a questa tipologia di bene culturale, applicabile potenzialmente anche ad altri casi di studio che presentano problematiche simili. La descrizione delle superfici e il monitoraggio degli spostamenti e delle deformazioni plastiche subite dai supporti nel tempo (in ambienti aperti o chiusi, controllati e non), fornisce l'individuazione dei parametri geometrici caratterizzanti il degrado degli affreschi e il suo decorrere nel tempo, in funzione a processi esterni, interni, naturali e artificiali. In particolare, i fenomeni strettamente interconnessi tra di loro, da monitorare

tramite le tecniche digitali proposte, risultano i seguenti:

- deformazioni localizzate dei pannelli;
- cedimento del sistema di ancoraggio;
- composizione interna dei supporti/disconnessione telai interni;
- presenza di cricche e sollevamenti della pellicola pittorica degli affreschi

La scelta della strumentazione da adottare per la verifica e lo studio dei fenomeni di cui sopra, oltre che dai principi della conservazione preventiva, è stata dettata da:

- dimensione dell'oggetto sotto indagine e scala di restituzione
- risoluzione richiesta, quindi il livello di dettaglio. La risoluzione indica l'intervallo minimo tra due dettagli discreti adiacenti che possono essere distinti l'uno dall'altro
- accuratezza strumentale, essa indica di quanto il valore indicato dallo strumento si discosta dal valore vero della grandezza misurata. La caratteristica di uno strumento di fornire misure vicine al valore vero della grandezza misurata viene detta accuratezza.
- reperibilità dello strumento e possibilità di trasporto e utilizzo *in situ*.

Ad oggi esistono numerosi sistemi di *shape acquisition* basati su varie tecnologie. Una panoramica è mostrata in Fig.3.1.

Ogni tecnica di acquisizione presenta vantaggi e svantaggi per cui non esiste una tecnica con prestazioni superiori ad un'altra in assoluto, ma la scelta dipende dalle applicazioni a cui è destinata. È possibile classificare le procedure di acquisizione 3D in funzione delle metodologie e delle tecniche utilizzate per rilevare le caratteristiche geometriche e colorimetriche degli oggetti. (Piras e Gabriele, s.d.). Come mostrato in Fig. 3.1, una prima suddivisione delle

metodologie per la creazione di modelli 3D) è la seguente:

1. Tecniche con contatto tra oggetto e sensori: CMM (*Coordinate Measurement Machine*).
2. Tecniche senza contatto, divisibili in due sottocategorie: attive e passive.

Le tecniche tramite contatto si basano sull'impiego di strumenti che eseguono la scansione delle forme per contatto dei sensori con l'oggetto stesso da rilevare. Le tecniche senza contatto passive utilizzano le radiazioni già presenti nell'ambiente, in particolare la luce naturale. Esempio di tale tecnica è la fotogrammetria, che utilizza riprese da diversi punti ottenendo fotogrammi dai quali è possibile ricostruire la forma dell'oggetto in base alle sue dimensioni. Tale tecnica è utilizzata principalmente in topografia, architettura e cartografia.

Le tecniche senza contatto attive utilizzano invece le radiazioni emesse dagli strumenti che, in funzione dei diversi casi, possono essere a frequenze ottiche oppure a frequenze appartenenti ad altre bande. Le informazioni sull'oggetto vengono ottenute dalle onde riflesse che colpiscono uno o più sensori dello strumento. Tralasciando ultrasuoni, raggi X e le frequenze dei RADAR, le radiazioni e gli strumenti che considero in questa tesi sono quelli che impiegano radiazioni laser: sono classificabili in funzione del metodo per calcolare le distanze: a tempo di volo, mediante la triangolazione oppure a differenza di fase.

In tale lavoro di tesi è stato scelto di seguire un approccio multi-analitico e multi-scala che ha previsto l'utilizzo di strumenti (riportati in grassetto in Fig. 3.1 ed esplicitati in Fig 3.2) quali:

- sistema Lidar (*Light Detection And Ranging*): ha previsto l'utilizzo di due laser scanner terrestre (TLS)

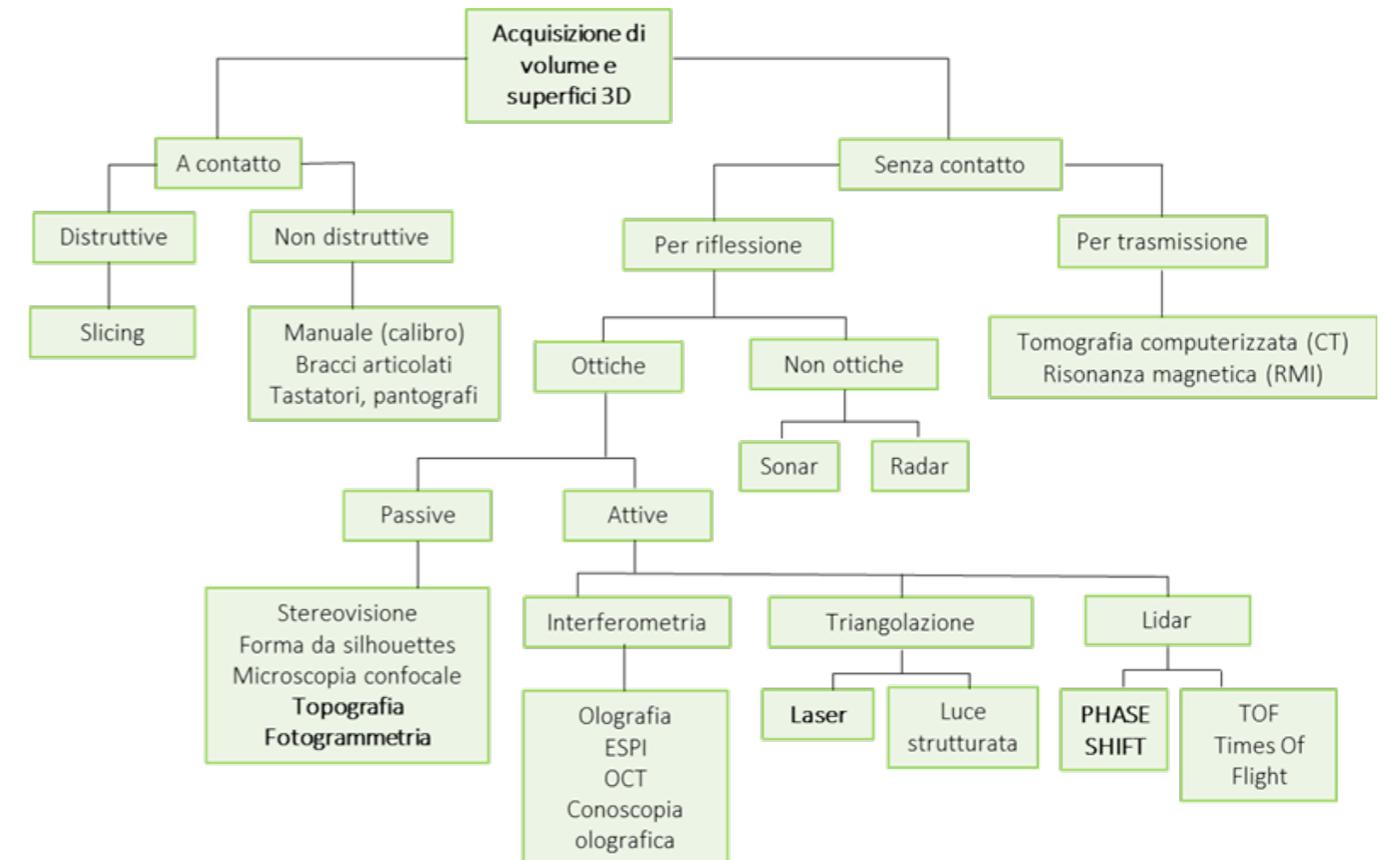


Fig.3.1 panoramica delle tecniche di shape acquisition.

per il rilievo a scala architettonica. In generale essi hanno un livello di accuratezza che va da circa 1 mm fino a 3 cm, con una distanza massima di misurazione inferiore a 100 m. L'acquisizione tramite laser scanner ha come obiettivo quello di ottenere informazioni geometriche e di quantificare le deformazioni dei supporti nel tempo, anche tramite la realizzazione di *Digital Elevation Model* (DEM).

- Stazione totale per il rilievo topografico: ha previsto l'utilizzo di una stazione totale con livello di accuratezza di 2 mm e una distanza massima di misurazione fino a 3000 m (in condizioni medie). L'obiettivo è la realizzazione di poligonali topografiche per ottenere punti di controllo (target) in termini di spazio e di tempo (monitoraggio). I punti di controllo fungeranno inoltre come punti di vincolo per l'allineamento del rilievo multi-scala.
- Rilievo fotogrammetrico *Structure from Motion*: ha previsto l'utilizzo di diverse fotocamere digitali. L'accuratezza della metodologia varia a seconda della distanza di ripresa, del sensore della macchina e della distanza focale. L'obiettivo dell'utilizzo della SfM è quelli di ottenere modelli 3D integrati con *texture*.
- Sistema laser a triangolazione attiva, per il rilievo di oggetti a piccola scala. Hanno un'accuratezza che va da 30 μ fino a 1 mm, con distanza massima dall'oggetto di circa 1-1,5 m. L'obiettivo in questo caso è la misurazione e scansione per il monitoraggio del quadro fessurativo sulla superficie degli affreschi.

Un ulteriore sistema che non fa parte delle metodologie di *shape acquisition*, ma che in tale studio è stato ampiamente analizzato e utilizzato anche per la realizzazione di modelli 3D è la tecnica di *imaging* in termografia Infrarossa. La termografia è una tecnica di analisi non distruttiva che si basa sull'acquisizione di immagini nella banda spettrale dell'infrarosso per controlli non distruttivi e non intrusivi in grado di fornire molteplici informazioni sull'oggetto rilevato. Le termocamere rilevano le radiazioni infrarosse e compiono misure correlate con l'emissione di queste radiazioni. Questo strumento è in grado di rilevare le temperature dei corpi analizzati attraverso la misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa dal corpo in esame (Bodnar et al. 2012), (Gusella, Cluni, e Liberotti 2020). L'interoperabilità delle tecniche sopra citate e l'integrazione dei loro dati, ha permesso di ottenere uno studio completo e non distruttivo sullo stato di conservazione dei pannelli e

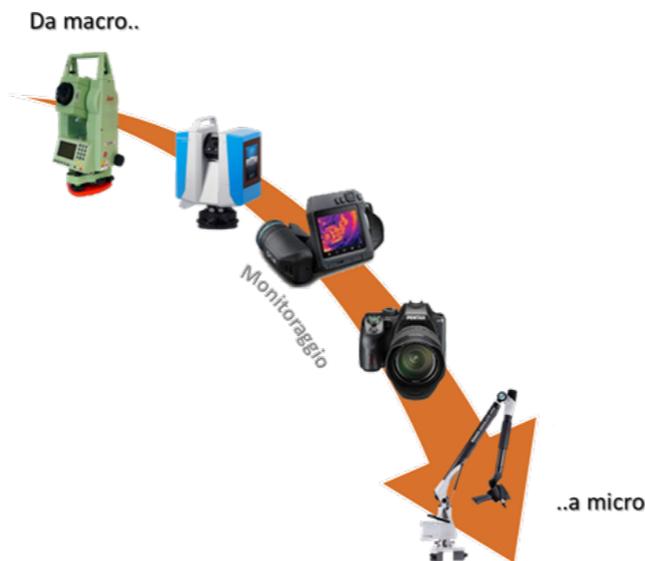


Fig. 3.2 metodologie di rilievo utilizzate nel presente lavoro di tesi.

degli affreschi, fino alla definizione di un protocollo analitico affidabile e riproducibile.

3.2 Rilievo laser scanner terrestre

Tra i sistemi *Range- Based* più diffusi ci sono i dispositivi basati su impulsi luminosi LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), tra i quali rientrano i cosiddetti laser-scanner 3D. Il risultato dell'acquisizione mediante questi dispositivi, che avviene in modo automatico e indipendente dalla morfologia dell'oggetto da rilevare, è un *asset* digitale composto da un insieme di punti sparsi nello spazio, ognuno dotato di coordinate metriche, che comunemente viene chiamato "nuvola di punti". Ogni strumento ha determinate caratteristiche che lo rendono più o meno adatto alle varie applicazioni. Le caratteristiche più rilevanti fondamentali da conoscere per programmare al meglio le campagne di misura laser scanner sono: la massima portata, la frequenza di acquisizione, la precisione sulla singola misura, la divergenza del fascio laser e la sua accuratezza. La qualità globale nell'acquisizione della nuvola di punti deriva dalla combinazione delle accuratezze ottenute nella misura delle singole caratteristiche fisico-geometriche, ed è influenzata inoltre da caratteristiche intrinseche all'oggetto rilevato e dalle condizioni ambientali (Aveta, 2011), (Pancani e Bigongiari 2020). I rilievi digitali all'interno del chiostro Verde sono stati effettuati con strumentazione laser-scanner terrestre (TLS) statici al fine di ottenere un modello

tridimensionale a colori il più completo possibile non solo degli affreschi, ma anche di tutto il complesso architettonico nel quale essi sono inseriti (Fig. 3.3 e 3.4). Inoltre la nuvola può essere utilizzata come riferimento affidabile per la realizzazione di disegni tecnici 2D (piante e sezioni trasversali) e come base di riferimento per l'allineamento e registrazione delle nuvole prodotte da altre strumentazioni.

Il rilievo è stato eseguito mediante due sistemi:

- Sistema laser-scanner FARO Focus M70 (*FARO® Focus Laser Scanners*) con fotocamera integrata. Ciascuna scansione ha prodotto una nuvola di punti tridimensionale con una risoluzione di 7.7 mm/10 m - la registrazione di tutte le scansioni con il software *Leica Cyclone* ha permesso di ottenere una nuvola di punti colorata in scala 1:1 con un errore massimo complessivo di circa 2 mm. In Tabella 3.1 si riportano le specifiche tecniche dello strumento:
- Sistema laser Imager Z+F (*Zoller+Frölich*) IMAGER 5016 che acquisisce fino a 1.000.000 di punti al secondo, con una portata massima di 79 m, rotazione orizzontale di 360° e verticale di 320°. Il sistema è dotato di una telecamera HDR che restituisce un dato a colori correttamente bilanciato. In Tabella 3.2 si riportano le specifiche tecniche dello strumento:

Laser scanner	Faro m70
Velocità massima:	Fino a 488.000 punti/sec
Accuratezza	2 mm a 10 m, 3,5 mm a 25 m
Errore di misurazione	±1 mm
Risoluzione verticale/orizzontale	0,009° (40.960 punti a 360°) verticale / 0,009° (40.960 punti a 360°) orizzontale
LaserHDR	Si
Campo visivo	300° verticale / 360° orizzontale
Campo di temperatura	Da +5° a +40 °C, Funzionamento esteso: da -10° a +55 °C, Stoccaggio: da -10° a +60 C °
Classe del laser	Classe 1 (ISO EN 60825-1). Laser che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, compreso l'impiego di strumenti ottici per la visione diretta del fascio (emissione a 1550nm)
Portata	0.6 - 70m

Tab 3.1 specifiche tecnica del sistema laser faro m70 <https://www.laser-scanning-europe.com/sites/default/files/redakteur_images/faro-focus-m70-tech-sheet_0.pdf>

Laser scanner	ZF 5016h
Velocità massima:	Fino a 1.000.000 punti/secondo
Accuratezza	0.1 mm fino a 50 m
Errore di misurazione	<1 mm
Risoluzione verticale/orizzontale °	0.0026° / 0.0018°
Laser HDR	Si
Campo visivo	320° verticale / 360° orizzontale
Campo di temperatura	esercizio (-10° C - +45°C) stoccaggio (-20° C - +50°C)
Classe del laser	Classe 1 (ISO EN 60825-1). Laser che sono sicuri nelle condizioni di funzionamento ragionevolmente prevedibili, compreso l'impiego di strumenti ottici per la visione diretta del fascio (emissione a 1550nm)
Portata	0.3 - 365 m (intervallo di ambiguità)

Tab 3.2 specifiche tecniche del sistema laser ZF 5016h <https://zf-usa.com/wp-content/uploads/2021/06/ZF-IMAGER-5016_Datasheet-E_compr.pdf>

Questi due sistemi appartengono alla classe dei Laser Scanner a Differenza di Fase (*Phase Shift - PS*), ovvero sistemi che calcolano la distanza attraverso algoritmi specifici in grado di rilevare la misura tramite la differenza di fase tra l'onda emessa e quella ricevuta. In questi sistemi il segnale emesso è un impulso continuo, detto *Continuous Wave* (CT), avente intensità modulata sinusoidalmente secondo una frequenza nota vicina a quella dell'infrarosso. In questo caso la misura della distanza viene ottenuta calcolando lo sfasamento (differenza di fase) tra l'onda emessa e quella ricevuta attraverso la seguente formula:

$$D = (c / 4\pi) \cdot (\Delta\phi / f_{AM})$$

Dove "D" è la distanza, "c" la velocità della luce (3x10⁸ m/s), "Δφ" la differenza di fase e "f_{AM}" la modulazione di frequenza. Questi sistemi laser-scanner si caratterizzano per possedere una velocità di acquisizione molto rapida, in cui la densità di dato acquisito può arrivare fino a 0,6 mm tra uno e l'altro ad una distanza di 10 m, con un'accuratezza fino a 2-3 mm.

3.3 Rilievo fotogrammetrico (tecnica *Structure from Motion*)

Tra i sistemi *image-based*, che riguardano un tipo di metodo di misura ottico passivo consistente nella ricostruzione di



Fig. 3.3 fasi del rilievo laser scanner.

un oggetto 3D sulla base di un insieme di immagini scattate a diverse distanze e con diversi angoli di visione, la più nota è la fotogrammetria digitale che basa il suo principio di funzionamento sul metodo denominato “Structure from Motion” (SfM). Mediante tale metodo è possibile ricostruire la forma di oggetti attraverso la collimazione automatica di punti da un insieme di foto scattate da posizioni diverse. Basata su algoritmi di Computer Vision, il software di elaborazione della tecnica SfM estrae i punti notevoli dalle singole foto, desume i parametri fotografici e incrocia i punti riconoscibili su più foto, trovando le coordinate nello spazio dei punti stessi (Ceruleo 2021), (Westoby et al. 2012). In particolare, dopo aver scattato le immagini mediante specifiche camere digitali, vengono utilizzati speciali algoritmi, solitamente

Scale Invariant Feature Transform (SIFT), che permettono di identificare punti omologhi dell’oggetto su immagini successive, i quali vengono poi attribuiti dai descrittori. Quindi, utilizzando il cosiddetto algoritmo di “bundle adjustment”, viene stimata la posizione della telecamera virtuale rispetto all’oggetto e viene creata una nuvola di punti 3D sparsa (sparse cloud) caratterizzata da informazioni colorimetriche provenienti dalle foto. Successivamente, al fine di ottenere una nuvola di punti 3D più densa, vengono utilizzati altri due algoritmi, il primo, detto CMVS (Clustering View from Multi-view Stereo), mette le immagini in clustering, mentre il secondo, detto PMVS2 (Path-based Multi-View Stereo), ne ricostruisce le informazioni 3D raccolte dai cluster (Eltner e Sofia 2020). La dense cloud ottenuta, per essere ritenuta metricamente e morfologicamente affidabile necessita di un’accurata calibrazione che consenta di associare le sue dimensioni a quelle corrispondenti all’oggetto reale. Questa procedura solitamente si basa su una trasformazione (scala) per punti omologhi rintracciabili su un riferimento metrico descrittivo del medesimo oggetto, come ad esempio una serie di misure prese direttamente *in situ*, un’altra nuvola di punti sviluppata da un rilievo laser-scanner o alcuni specifici target, detti GCP (Ground Control Point), acquisiti mediante rilievi topografici o tecniche satellitari GNSS. Molti software dedicati a questa metodologia, inoltre, permettono ulteriori step operativi per una ricostruzione digitale dell’oggetto più realistica. La nuvola densa, adeguatamente e metricamente referenziata, può essere infatti soggetta ad una procedura di poligonalizzazione basata su metodi di *meshing*. Comunemente per tali elaborazioni viene adottato l’algoritmo di *Delaunay*, il quale prevede prima la proiezione di tutti i punti tridimensionali su un piano, poi l’identificazione di quelli con distanza minima, e infine il loro collegamento. Una volta determinate le connessioni, il set di potenziali triangoli viene riproiettato nello spazio tridimensionale e topologicamente verificato. Infine, su questa nuova superficie a triangoli, detta TIN (Triangulated Irregular Network), è possibile procedere ad un ulteriore step di rappresentazione fotorealistica, ovvero, mediante tecniche di texture mapping, sul modello mesh viene proiettata la texture fotografica estratta dalle foto di partenza, andando così a creare un vero e proprio modello tridimensionale e cromaticamente realistico, dal quale è inoltre possibile estrapolare ortofotopiani bidimensionali descrittivi di aree specifiche del modello (Iglhaut et al. 2019). Un’ulteriore opportunità offerta da questa tecnica è la possibilità di realizzare il modello digitale di elevazione (DEM), ovvero un modello 2,5D di una superficie rappresentato sotto forma

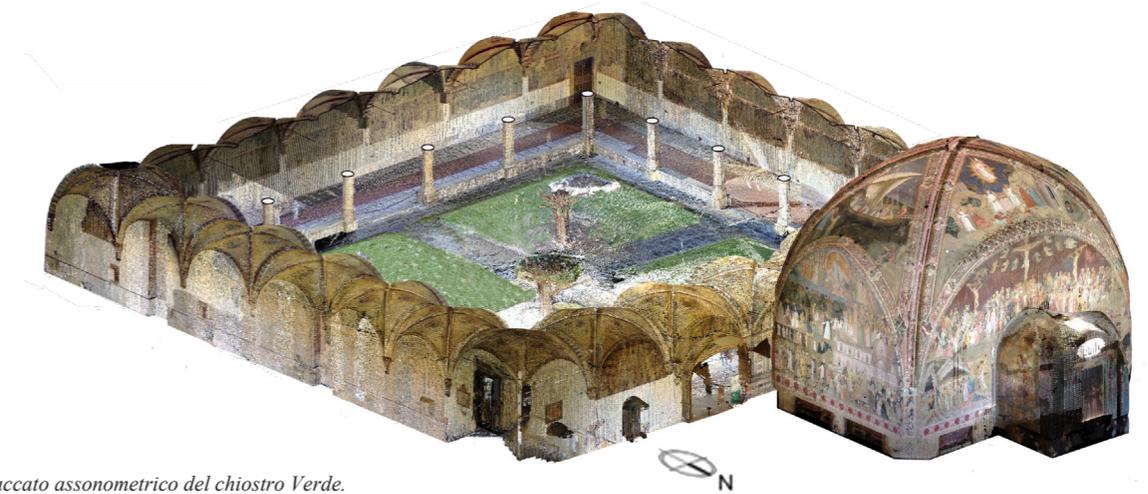


Fig. 3.4 spaccato assonometrico del chiostro Verde.

di griglia regolare, dove ogni cella (quadrata) ha associata una coppia di coordinate X,Y ed un’informazione di elevazione. I DEM possono essere rasterizzati a partire da una nuvola di punti densa, da una nuvola sparsa, da una *mesh* o generati direttamente da mappe di profondità. La maggior parte dei programmi di fotogrammetria permette di creare sia un modello digitale di superficie (DSM), cioè un modello 2,5D della superficie terrestre con tutti gli oggetti su di essa, sia un modello digitale del terreno (DTM), che rappresenta la superficie nuda del suolo senza alcun oggetto, come piante ed edifici. Il DEM può servire come fonte per il calcolo delle curve di livello. Quest’ultime sono curve che uniscono i punti con uguale quota, ovvero uguale distanza verticale dal piano di riferimento al quale è stato attribuito quota zero e la distanza tra le curve viene chiamata equidistanza. Esse sono molto utili, soprattutto in cartografia, in quanto rappresentano l’orografia, la morfologia e l’altimetria dell’area modellata. Questa metodologia di rilievo *image-based* appare quindi molto vantaggiosa per la ricostruzione tridimensionale di oggetti afferenti al Patrimonio Culturale, soprattutto in termini di velocità di acquisizione, economicità degli strumenti e campo di misura. Tuttavia, una particolare attenzione va posta alla fase di presa delle foto, le quali dovranno “coprire” interamente la morfologia dell’oggetto al fine di ottenere un modello complessivo. Per sopperire a questa criticità, negli ultimi anni si è diffuso sempre di più l’utilizzo di dispositivi aerei, i cosiddetti UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o più comunemente “droni”, i quali permettono, grazie ad un adeguato equipaggiamento fotografico, la ripresa dell’oggetto di studio a 360° con scatti zenitali e obliqui a differenti quote altimetriche.

Nel presente lavoro di tesi la fotogrammetria è stata realizzata sfruttando la tecnica SfM e, a partire da una serie di immagini fotografiche, opportunamente elaborate da *Agisoft Metashape*, è stato estratto il modello 3D. Tutte le foto sono state scattate utilizzando una fotocamera digitale Pentax K1 dotata di un obiettivo da 28-70 mm, un sensore *Full Frame* di 24x36 mm, impostando una distanza focale di 50 mm. Le sequenze fotografiche realizzate all’intero della sala museale sono state realizzate utilizzando sorgenti luminose LED orientate a 45° rispetto alla superficie dell’affresco e impostate a una temperatura colore di 4400 K (appartenente alla gamma dei bianchi neutri) e ad un’intensità del 100%. La scelta degli illuminanti si è resa necessaria data la forte disomogeneità di illuminazione prodotta sugli affreschi dall’attuale sistema di illuminazione della sala. Inoltre, è stato utilizzato un ColorChecker (*X-Rite*) per la corretta calibrazione del bianco e la generazione di un profilo di colore specifico in base alle diverse condizioni di illuminazione. Il *set-up* strumentale è mostrato in Fig 3.5. La calibrazione con il ColorChecker è stata realizzata per ogni affresco (interno ed esterno). Un ulteriore parametro considerato in fase di acquisizione è stato quello di determinare la giusta distanza tra la fotocamera e l’affresco per ottenere una buona risoluzione finale dell’immagine (Cabezos-Bernal et al., 2021). In particolare, la fotocamera digitale e il treppiede sono stati posizionati a una distanza di 1,80 m dagli affreschi, che ci ha permesso di ottenere una *Ground Sampling Distance* (GSD) ottimale. La GSD, ovvero il fattore utilizzato in fotogrammetria per esprimere la distanza tra due pixel consecutivi misurati sul modello (in questo caso sull’affresco) indica dunque la risoluzione: più basso è il valore della GSD dell’immagine, maggiore è la

risoluzione spaziale dell'immagine e più dettagli sono visibili.

La GSD è definita dall'equazione seguente:

$$GSD = (S_w \cdot D \cdot 1000) / (F_R \cdot imW)$$

Dove:

S_w = larghezza del sensore della fotocamera (mm): 36

D = distanza della fotocamera dall'oggetto (m): 1.80

F_R = Distanza focale dell'obiettivo (mm): 50

imW = Larghezza dell'immagine (pixel): 7320

In base a questi parametri, la GSD relativa agli affreschi è stata impostata a 0,18 mm/pix. I modelli 3D ottenuti sono stati poi scalati riconoscendo i punti omologhi identificati sulla nuvola di punti del laser scanner.

3.4 Rilievo con laser di precisione *close-range*

Il braccio di misura a coordinate (CMA) è un dispositivo che può eseguire misure sia a contatto che senza contatto; è



Fig. 3.5 set-up utilizzato per il rilievo fotogrammetrico Structure from Motion all'interno della sala del Museo.

mobile, manuale, rapido e ad alta risoluzione (Ryniewicz et al. 2017), (Paulus et al. 2014). Grazie a queste caratteristiche, il sistema utilizzato in questo caso di studio è risultato fondamentale per analizzare e monitorare dettagli dell'opera quali distacchi, sollevamenti nello strato pittorico, nuova formazione di cretti sulla pellicola pittorica e movimenti di contrazione/dilatazione delle lesioni già formate. Le misure sono state effettuate utilizzando il Romer Absolute Arm 7320SI (Hexagon Metrology) con scanner laser RS3 integrato (Fig. 3.7). Tale sistema ha una struttura interna formata da sette coppie di rotazione, di cui quattro con rotazione completa di 360°: ogni coppia è dotata di un sistema di misurazione dell'angolo (un *encoder* assoluto). Il braccio di misura è integrato da un laser scanner a triangolazione attiva RS3 (lunghezza d'onda 635 nm) senza contatto. Le specifiche tecniche sono riportate in tabella 3.3. I parametri del braccio a 7 assi con scanner integrato sono i seguenti: il campo di misura ± 2000 mm, la ripetibilità spaziale $\pm 0,044$ mm, la precisione del sistema scanner 0.079 mm. La procedura di misura ha previsto l'osservazione della proiezione dello spot laser sulla superficie di misura con sensori di immagine CCD. Il laser integrato acquisisce



infatti tramite triangolazione attiva, ovvero un metodo che permette il calcolo delle distanze sfruttando le proprietà geometriche dei triangoli. Il termine triangolazione deriva dalla posizione di un emettitore, di un oggetto da analizzare e di un ricevitore, i quali formano appunto un triangolo. Emittitore e ricevitore sono separati da una distanza nota a priori (base line), sulla quale si basa il principio della triangolazione (Piras e Gabriele, s.d.). In generale la tipica configurazione che sfrutta la triangolazione è riportata in

Laser scanner	Romer Absolute Arm 7320Si (Hexagon Metrology)
Velocità massima:	Fino a 752.000 punti/secondo
Accuratezza	30 μ
Errore di misurazione	0,009 mm
Risoluzione verticale/orizzontale	0.014 mm
LaserHDR	No
Campo visivo	310° verticale / 360° orizzontale
Campo di temperatura	5°C - 40°C, stoccaggio (-25°C - +70°C)
Classe del laser	2M
Portata	0.04 - 2 m

Tab 3.3 specifiche tecniche del sistema laser Romer Absolute Arm 7320Si (Hexagon Metrology) < <https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/datasheets/hexagon-romer-absolute-arm-datasheet-1.pdf?ext=.pdf> >.

Fig. 3.8 e prevede un emettitore utilizzato per proiettare una radiazione sull'oggetto da analizzare ed un sensore che riceve la radiazione riflessa. Nel caso di studio degli affreschi di Paolo Uccello e della sua bottega, l'acquisizione è stata realizzata in modalità "high quality", con densità di campionamento di 0.1 mm/1 m. Ogni scansione *close-range* è stata eseguita manualmente dall'operatore, seguendo il profilo della superficie senza limitazioni di orientamento angolare specifico. I dati di *output*, rappresentati come nuvola di punti XYZ, sono stati poi ottimizzati attraverso l'eliminazione di punti distanti e filtrati tramite il software *3DReshaper Meteor*, ovvero un software dedicato alla metrologia e polivalente in termini di modellazione 3D, integrato da strumenti di ispezione 3D e CAD. Non è stata applicata nessuna operazione di triangolazione e smoothing in fase di post-produzione del dato, in quanto la loro georeferenziazione tramite i target ed il consecutivo allineamento alla nuvola di punti da laser TLS è stata eseguita tramite il software *Leica Cyclone (Leica Geosystem)*, che gestisce

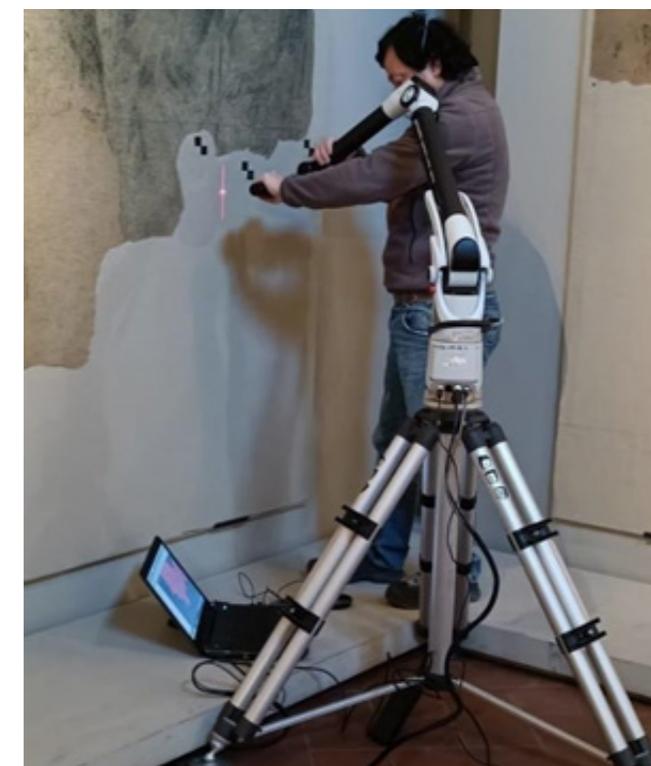


Fig. 3.7 fasi di rilievo con laser Romer Absolute Arm 7320SI. solamente nuvole di punti e non *mesh*. Nel caso della tecnica di triangolazione attiva, si hanno i seguenti vantaggi:

- Alta precisione (di ordine sub-millimetrico per i laser scanner triangolatori e scanner a luce strutturata);
- Possibilità di misurare quasi tutti i tipi di materiale;
- Indipendenza dalla luce ambientale.

Gli svantaggi sono i seguenti:

- distanza tra oggetto e sensore limitata;
- dipendenza delle prestazioni dal tipo di materiale illuminato. Le riflessioni speculari di oggetti metallici, per esempio, possono creare un disturbo e degradare le prestazioni del sistema;
- il sistema deve prevedere la movimentazione dell'oggetto

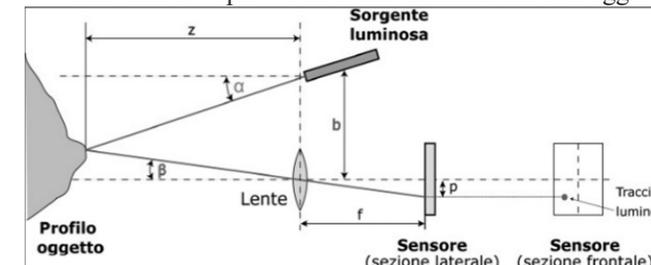


Fig. 3.8 scheda di principio di uno scanner 3D a triangolazione con emissione di un singolo spot di luce laser (in Russo, 2011).

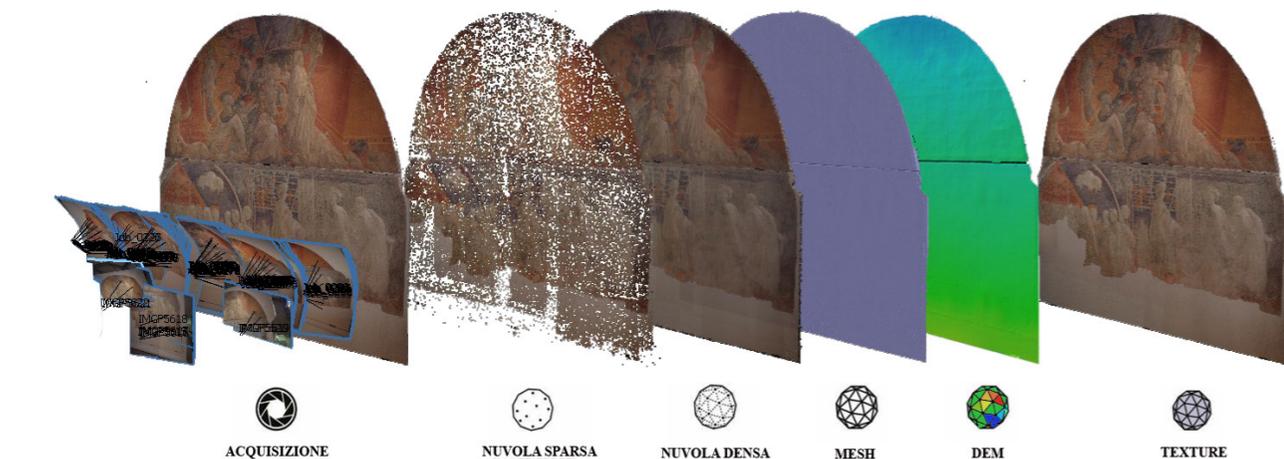


Fig. 3.6 workflow fotogrammetrico SfM.

o della componente laser con un incremento dei costi nella realizzazione meccanica.

3.5 Rilievo termografico IR

La termografia nell'infrarosso termico è un'indagine diagnostica non invasiva e portatile, basata sulla misura della temperatura superficiale di un oggetto mediante la rivelazione delle onde elettromagnetiche (IR) da questo riflesse. L'occhio umano può rilevare solo le onde luminose visibili o le radiazioni visibili dello spettro elettromagnetico (0,40 - 0,78 μm) che sono il risultato di radiazioni indirette (o riflesse) fornite dalla radiazione solare o da luci artificiali (Balaras e Argiriou 2002). L'occhio non è in grado dunque di rilevare la radiazione infrarossa (IR) compresa tra le lunghezze d'onda di 0,78-15 μm , ovvero tra la coda della banda spettrale visibile e la banda spettrale delle microonde. Tutti gli oggetti irradiano energia che viene trasportata sotto forma di onde elettromagnetiche, che viaggiano alla velocità della luce. La quantità di energia che lascia una superficie come calore radiante è proporzionale alla sua emissività e alla quarta potenza della sua temperatura assoluta, secondo l'equazione data da:

$$q'' = \sigma \epsilon T^4$$

dove q'' è il potere emissivo totale emisferico irradiato per unità di superficie (W/m^2), σ la costante di Stefan-Boltzmann ($5,67051 \cdot 10^8 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), ϵ l'emissività totale emisferica della superficie ($0 < \epsilon < 1$) e T è la temperatura assoluta della superficie (K). Qualsiasi oggetto con una temperatura diversa dallo zero assoluto ($-273,158 \text{ }^\circ\text{C}$ o 0 K) emette energia nell'infrarosso. In queste condizioni, più alta è la temperatura di un oggetto, più radiazione IR emette. Le misure di spot IR possono essere effettuate utilizzando un semplice sensore radiometrico IR. Il sensore misura l'energia IR emessa dall'oggetto e la converte in una lettura digitale della temperatura. Tuttavia, un radiometro puntiforme non fornisce un'immagine dell'oggetto e, quindi, è difficile individuare con precisione il problema senza scansionare l'intero oggetto o la superficie. Una termocamera IR è un dispositivo che produce un'immagine dei modelli termici ed è calibrata per misurare il potere emissivo delle superfici in un'area a vari intervalli di temperatura. Le termocamere utilizzano una lente per

focalizzare la radiazione IR emessa su un rilevatore e il segnale elettrico di risposta viene convertito in un'immagine digitale in cui i diversi colori (o scale di grigio) corrispondono ai vari livelli di temperatura della superficie bersaglio su cui è focalizzata. I software disponibili possono poi essere utilizzati per analizzare le immagini termografiche e persino quantificare queste differenze (Korukçu e Kilic 2009). L'immagine infrarossa che si crea (anche detta termogramma) è una matrice in cui il valore dell'intensità della radiazione IR, o l'intensità convertita in temperatura superficiale, è memorizzato in ogni elemento della matrice corrispondente a ciascun pixel (Kylili et al. 2014). La termocamera IR cattura una porzione di superficie che dipende dal campo visivo (FoV) dell'obiettivo della termocamera e l'immagine IR ha una risoluzione che dipende dal numero di pixel del sensore. Un limite delle termocamere commerciali è la mancanza di un'alta risoluzione del sensore per catturare aree più ampie con una risoluzione spaziale sufficiente (Ham e Golparvar-Fard 2013). In tale lavoro di tesi il dispositivo utilizzato per l'indagine IRT è la termocamera all'infrarosso FLIR T540. La termocamera opera nell'intervallo di spettro 7,5-14,0 μm , ha una sensibilità termica di (NETD) $< 30 \text{ mK}$ a $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (lente ottica di 42°) di 50mK, un intervallo di temperatura da $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+350 \text{ }^\circ\text{C}$, una precisione di temperatura di $\pm 2^\circ\text{C}$ e un sensore microbolometrico non raffreddato di 17 micron (le specifiche del dispositivo sono riportate nella Tabella 3.4). La termocamera T540 acquisisce non solo le immagini IR, ma anche le immagini RGB grazie a due sensori indipendenti, un sensore IR e un CCD comune per il visibile (VIS). In questo modo è possibile acquisire non solo l'immagine termica, ma anche la corrispondente immagine nello spettro visibile. Di solito le immagini RBG ottenute da una termocamera non vengono utilizzate per casi applicativi a causa della loro bassa risoluzione (348 x 464, la stessa delle immagini termiche), ma si è visto come esse possono comunque essere utilizzate come un valido strumento per la creazione di un modello 3D RGB a supporto del modello 3D IRT e per una loro co-registrazione (Hoegner et al. 2016). In questo caso il rilievo termografico ha come obiettivi:

- L'individuazione di possibili infiltrazioni di acqua e fenomeni di condensa superficiale sugli affreschi;
- Il riconoscimento non invasivo della tipologia e struttura del supporto senza la necessità del suo smontaggio, operazione molto rischiosa e dispendiosa;
- L'identificazione di vuoti d'aria sul retro

Termocamera	FLIR T540 24° + 14° & 42°
Lenti	IR lens, f=17 mm (24°) with case
Obiettivo focale	17 mm
Risoluzione	464 x 348
Campo visivo (in gradi)	24.00
Minima messa a fuoco	0.15 m (0.49 ft.)
Distanza iperfocale	7.73 m (25.35 ft.)
Pixel pitch	17 μm

Tab 3.4 parametri tecnici termocamera FLIR T540.

- dell'affresco riconducibili a deformazioni/distacchi;
- La valutazione dello stato di conservazioni dei singoli pannelli costituenti i supporti (mancanza di interconnessioni tra i pannelli);
- L'integrazione, in scala, delle informazioni ottenute dai modelli laser scanner e fotogrammetrici al fine di ottenere modelli geo-morfometrici e radiometrici (Fig 3.9).

3.6 Target come punti di controllo per il monitoraggio

Per eseguire un rilievo laser scanner nel migliore dei modi, la prima cosa da fare è individuare una strategia d'azione pianificando passo dopo passo ogni momento del rilievo per evitare situazioni di imprevisto, perdite di tempo ed errori. Anche la parte "logistica" ha un ruolo chiave per il successo di un buon rilievo laser scanner, in riferimento a tutte quelle attività che seguono la pianificazione del rilievo e che la supportano, come montare correttamente lo strumento o, quando e se richiesto, posizionare in modo intelligente i *target*. I *target*, comunemente chiamati anche bersagli o marcatori, sono accessori di supporto al rilievo, di fondamentale importanza per la buona riuscita di un rilievo laser scanner e soprattutto per la registrazione dei dati acquisiti (Ge e Wunderlich 2015). Utilizzare i giusti *target* e saperli posizionare nel modo corretto, permette di facilitare l'attività di acquisizione dei dati rendendo il risultato finale accurato. È preferibile avere a disposizione diversi *target* con forme diverse, ma soprattutto dimensioni diverse. A seconda del tipo di indagine, delle dimensioni dell'area e di altri fattori che possono essere determinanti, sarà necessario utilizzare il bersaglio giusto per rendere la scansione il più semplice possibile. In letteratura (Becerik-Gerber et al. 2011) la registrazione con *target* è stata ampiamente utilizzata, soprattutto nel settore dell'industria delle costruzioni, in quanto ha il potenziale di rispondere

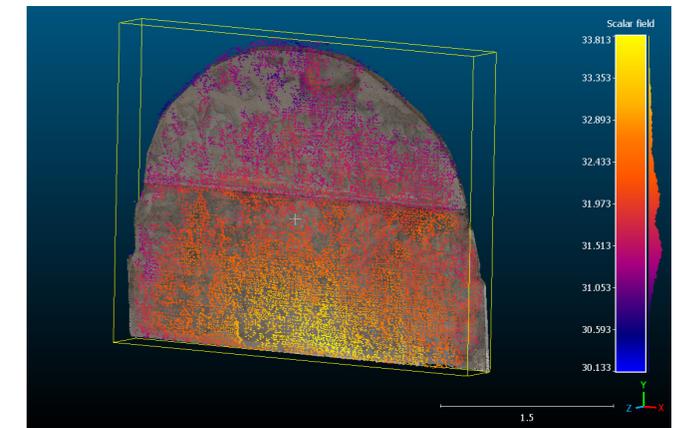


Fig. 3.9 porzione di nuvola di punti fotogrammetrica con integrazione della nuvola IRT ottenuta dal rilievo termografico IR.

alle esigenze in termini di accuratezza richiesta, scala del problema, portata del lavoro e risoluzione delle nuvole di punti. Esistono fondamentalmente due tipi di *target*:

- Punti morfologici di riferimento: sono così chiamati perché sono riconoscibili all'interno della scansione per mezzo di peculiarità morfologiche dell'oggetto scansionato, come bordi, finestre, elementi riconoscibili e particolari.
- *Target* piani: posizionati all'interno dell'area da scansionare, i *target* artificiali sono generalmente composti da materiali particolarmente visibili e riflettenti alla lunghezza d'onda del laser scanner. L'obiettivo è creare punti facilmente riconoscibili dallo strumento per facilitare l'acquisizione e la registrazione dei dati.

Quest'ultima tipologia di *target* mostra alcuni svantaggi: i problemi principali legati ai bersagli sono principalmente identificabili nel loro posizionamento durante un'indagine. Indubbiamente sapere come posizzionarli nel posto giusto è la cosa più importante: un bersaglio mal posizionato rischia di non essere ben visibile e quindi potenzialmente inutile. Anche il materiale di cui è fatto il bersaglio rappresenta una variabile da non trascurare. Se il *target* è artificiale, deve essere ben visibile, non lucido o trasparente, altrimenti lo scanner potrebbe avere difficoltà a identificarlo, rischiando di ottenere risultati errati e distorti, ad esempio il punto rilevato potrebbe essere più vicino o più lontano dalla sua reale posizione. Deve essere posta attenzione anche alla stampante, che non sia a getto d'inchiostro altrimenti durante la scansione laser il bersaglio risulterà completamente bianco in quanto lo strumento non sarà in grado di distinguere il colore nero.

Nell'ultimo decennio la registrazione a mezzo *target* (sia

naturali che artificiali) è sempre meno utilizzata, in quanto l'avanzamento della tecnologia ha permesso di ottenere un processo di registrazione semi-automatico, in cui le varie scansioni ottenute da laser scanner vengono registrate attraverso una serie di rototraslazioni rigide tra nuvole di punti limitrofe, individuando i loro punti omologhi al fine di determinare il loro allineamento. Questa registrazione detta "cloud-to-cloud" permette così di ottenere una singola nuvola di punti globale comprendente tutti i dati acquisiti in fase di rilievo strumentale. Questo metodo è in grado di gestire nuvole di punti arbitrarie con una ragionevole sovrapposizione a coppie, senza conoscere il loro orientamento iniziale e senza la necessità di marcatori artificiali o altri oggetti specifici (Theiler, Wegner, e Schindler 2015), (Kelbe et al. 2016). È importante, tuttavia, programmare il posizionamento della stazione di ripresa in maniera corretta, in modo da garantire il 70% di sovrapposizione tra una scansione e l'altra, per avere scarti di registrazione inferiori a 3mm e riuscire ad allineare le nuvole, (Huber e Hebert 2003).

Nell'ambito del monitoraggio degli affreschi del chiostro Verde, la necessità di avere un controllo accurato spaziale e temporale degli affreschi ha indirizzato lo studio verso l'utilizzo di target ideati in maniera appropriata a seconda dell'oggetto dell'indagine. Il *target*, che verrà georeferenziato tramite la costruzione di una rete topografica, avrà in questo modo la funzione di "punto di vincolo" dal quale partire per lo studio dei macro e micro movimenti relativi ai pannelli degli affreschi. Infatti, se il rilievo digitale integrato con sistema LIDAR offre la possibilità di ottenere informazioni relative alle deformazioni in scala centimetrica e millimetrica degli affreschi, l'utilizzo dei target permetterà di allineare il rilievo di dettaglio al rilievo generale e monitorare i movimenti sub-millimetrici degli affreschi.

Alla luce di tali considerazioni è stata dunque avviata una ricerca per l'identificazione del corretto *target* da utilizzare per questo caso di studio. Data la varietà dei metodi di rilievo utilizzati era necessario un target con le seguenti caratteristiche:

- Alta visibilità: i *target* si devono vedere bene, anche a grande distanza e si vede distinguere soprattutto il suo centro;
- Facile individuazione del loro centro, per attribuire con precisione, e nel posto giusto, le coordinate rilevate;
- Facile trasportabilità nell'area del rilievo;
- Posizionamento agile su parete e a terra;
- Rimovibilità, senza lasciare tracce al termine delle

- operazioni;
- Leggerezza;
- Dimensione adeguata alla tipologia di rilievo e al tipo di supporto;
- Adattabilità alle caratteristiche del supporto nel quale verranno posizionati.

La prima caratteristica richiesta, ovvero l'alta visibilità, rappresenta in questo caso un punto cardine, considerando che le diverse tecnologie utilizzate (laser scanner, fotogrammetria, stazione totale e termografia IR) utilizzano diverse sorgenti di emissione e restituiscono un dato di *output* molto diverso tra di loro. La nota questione legata all'uso dei punti di riferimento per le applicazioni fotogrammetriche e laser che prevedono anche l'uso di immagini termiche è legata alle difficoltà di identificazione univoca dei tradizionali *marker* - spesso in carta o plastica - che vengono solitamente apposti sulle superfici rilevate e misurati con i metodi topografici convenzionali (Wang et al. 2023). Questa criticità viene spesso risolta utilizzando marcatori composti da materiali a bassa emissività (ad esempio, l'alluminio, caratterizzato da un'emissività di $\approx 0,04-0,09$) (Adamopoulos et al. 2020), (Grechi et al. 2021), marcatori retroriflettenti (formati da fogli riflettenti) o marcatori attivi indotti termicamente con un resistore elettrico come fonte di calore artificiale al centro. Tuttavia, come riportato da Patrucco (Patrucco et al. 2022), è possibile utilizzare anche punti estratti in quelle aree in cui il contrasto radiometrico tra materiali adiacenti ed elementi con diversa emissività consente il riconoscimento univoco dei punti selezionati anche in assenza di marcatori artificiali. Alla luce di tali considerazioni, a seconda delle tipologie di misura, è stato testato un *target* che sembrava corrispondere al meglio alle caratteristiche di cui sopra (si veda tabella 3.5). Se per il rilievo fotogrammetrico e termografico la tipologia di target rispondeva a tutti i requisiti richiesti, considerando tuttavia che le riprese devono essere fatte ad una distanza di circa 2 m dall'oggetto per una corretta messa a fuoco del target e dunque corretta visibilità del crocefile, le problematiche maggiori sono sorte dal rilievo laser scanner, in quanto non per tutte le scansioni il target risultava ben visibile e risolto. È stato scelto quindi di approfondire tale questione. La tipologia di target mostrata in tabella x è stata testata nei locali di Santa Verdiana, una delle sedi del dipartimento di Architettura di Firenze. Nelle stanze in questione sono state posizionati 5 target a scacchiera ad una distanza nota tra di loro. La localizzazione delle scansioni laser di risoluzione 1/8 e qualità 3x (12,3 mm/10 m) e dei target è mostrata in

Fig 3.10. In tale immagine si evince che la visibilità dei *target* non è uguale per tutte le immagini, in particolare:

- I *target* devono essere il più ortogonali possibile alla stazione di scansione (ad esempio il *target* 2 e 3, che sono quelli meno ortogonali, non si vedono in modo ottimale);
- Il foglio di alluminio deve essere ben opacizzato, satinato altrimenti riflette la luce laser;
- Le scansioni devono essere fatte in prossimità del target per avere un'altra risoluzione e visibilità del crocefile (il *target* 5, posto a solo 1 m dalla scansione laser risulta molto denso e ben risolto).

Alla luce di tali considerazioni è stato deciso di adottare la tipologia di target testata, ma rispettando tutte le accortezze di cui sopra e abbinandolo a due ulteriori target, mostrati in tabella 3.6. Infatti, se da un lato il target biadesivo con i due quadrati in alluminio risultava funzionale soprattutto per la co-registrazione delle immagini nell'infrarosso termico, esso risultava troppo invasivo per la sua apposizione negli affreschi e di difficile visibilità tramite laser su braccio meccanico (sia in termini di accuratezza per la visibilità del crocefile, sia in termini di produzione di rumore dovuto alle riflessioni speculari del foglio di alluminio).

È stato dunque deciso di abbinare al target di 10 cm x 10 cm con quadranti in alluminio anche target di 5 cm x 5 cm stampati su carta (grammatura 80 g/m²) con quadranti neri stampanti non a getto d'inchiostro (da apporre sulle pareti e sui pannelli che sostengono gli affreschi all'interno della sala) e target di 5cm x 5 cm in carta giapponese (grammatura 11 g/

m²) con quadranti neri realizzati con inchiostri non solubili in acqua e altri solventi polari, da far aderire direttamente sulla superficie dell'affresco (Fig 3.11). La carta giapponese è utilizzata nel restauro per la tecnica della velinatura ed in delicati interventi di pulitura del film pittorico. In questo caso la sua adattabilità alla superficie pittorica e la possibilità di essere inserita e rimossa con facilità da una superficie così delicata, l'ha resa ideale per la realizzazione di questi target. Per la loro applicazione è stato utilizzato come adesivo il Klucel® G all'1% in peso in acqua deionizzata. Questo prodotto è una cellulosa modificata, una idrossipropilcellulosa, che permette di addensare soluzioni acquose e soluzioni di solventi organici polari come l'alcool etilico, le ammine, il dimetilsolfossido. È solubile in acqua e nella maggior parte dei solventi organici polari, quindi potrà essere facilmente rimosso con acqua e alcool etilico, anche dopo lunghi tempi di apposizione.

3.7 Rilievo topografico

Per qualsiasi operazione di monitoraggio geodetico e topografico, la scelta e la materializzazione di un sistema di riferimento stabile è fondamentale per poter comparare nel tempo le misure e definire spostamenti e deformazioni (Alba 2023). Ovviamente il problema può presentare un grado di complessità diverso in funzione di diversi fattori:

- presenza o meno di riferimenti stabili;
- numero di campagne di misura (tempistiche) necessarie;
- accuratezza richiesta per le misure al fine di individuare

Target	Fotogrammetria	Laser scanner	Termografia IR
Target a scacchiera 10 cm x 10 cm, in carta biadesiva. I quadrati di contrasto bianchi sono ricoperti con foglio di alluminio leggermente satinato.			

Tab 3.5 tipologia di target, 1 test.

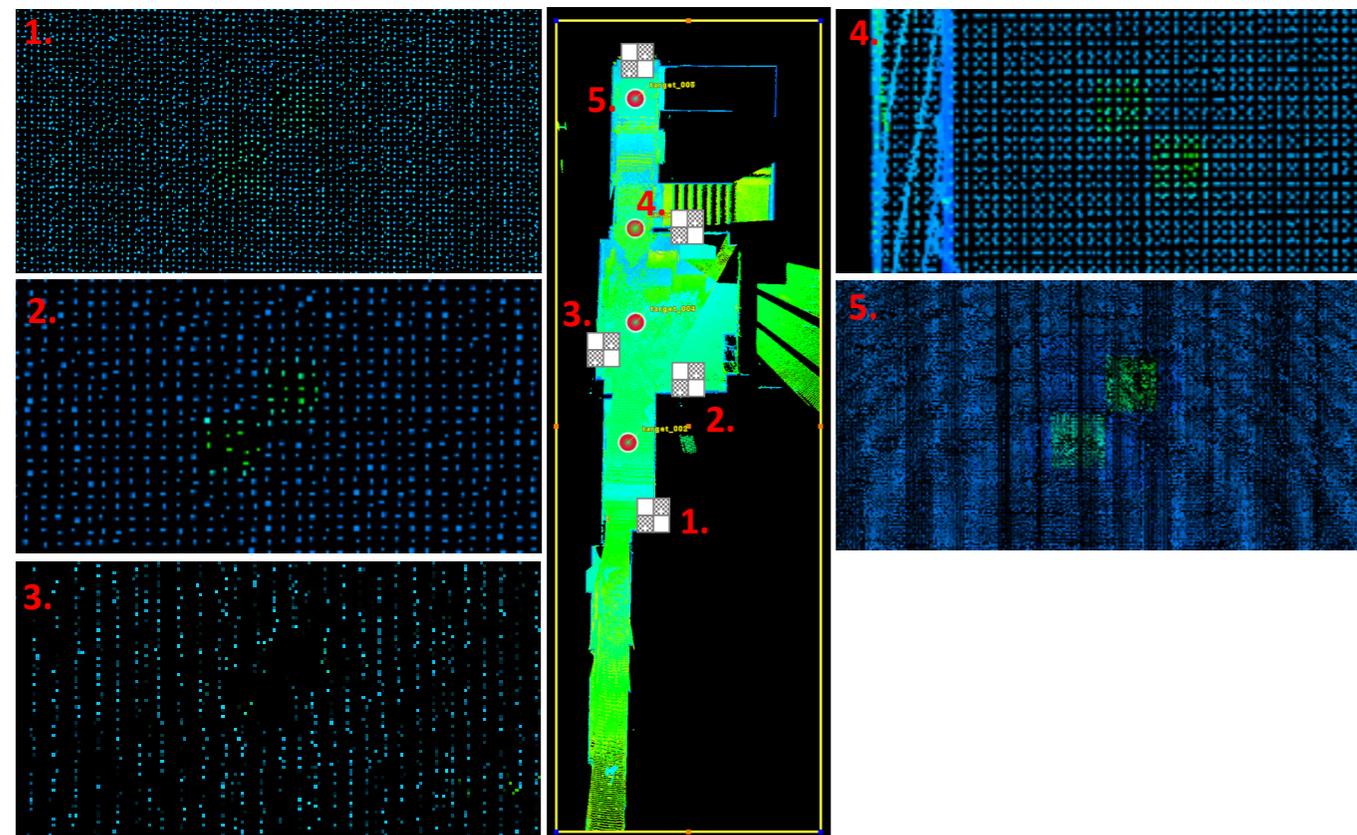


Fig. 3.10 planimetria di alcuni locali di Santa Verdiana, con evidenziate le stazioni di scansione laser scanner (pallini rossi) ed il posizionamento dei target, con relative immagini in riflettanza.

deformazioni significative;

- estensione dell'area sotto osservazione.

Le reti topografiche materializzate e misurate in prossimità delle pareti della stanza museale con conservati gli affreschi di Paolo Uccello e bottega sono state realizzate con molteplici scopi:

- determinare le coordinate dei Ground Control Points (GCP), ovvero i target da utilizzare per la georeferenziazione delle scansioni;
- controllare la stabilità nel tempo dei punti di stazione utilizzati per il monitoraggio TLS (monitoraggio generale per le deformazioni centimetriche e millimetriche);
- validare l'analisi delle deformazioni sub-millimetriche rilevate dal monitoraggio laser di dettaglio.

Durante la prima campagna di misura (tempo 0) è stata determinata la rete topografica, da utilizzare dunque come punto di partenza per il monitoraggio con le successive campagne di rilievo (Fig. 3.12). La decisione di inserire i target solamente nella sala museale (sono stati rilevati punti a terra, sulle pareti

murarie e sui pannelli espositivi) per la costruzione della rete topografica, è stata dettata dal fatto che lì gli affreschi si trovano fissati a dei pannelli espositivi che, benché saldamente ancorati tramite boccole e staffe, non rappresentano punti stabili per l'affresco, a differenza di quelli esterni che sono ancorati alla muratura e delimitati da peducci.

Per lo studio in questione è stata utilizzata una stazione totale Leica TCR 705 (Leica Geosystem), con misura della distanza tramite laser ad infrarossi. Portata su prisma circolare GPR1 (Leica) 3000m (condizioni medie) e accuratezza 2mm + 2ppm/< 1 sec.

3.8 Monitoraggio temporale dei dipinti murali del chiostro Verde

Le metodologie di rilievo sopra descritte costituiscono il supporto più efficace per una corretta conservazione preventiva, incluse le risorse per rispondere agli aspetti emergenziali e/o di urgenza legati agli affreschi staccati su varie tipologie di

Tipologia di target	Target cm 10 cm x 10 cm in alluminio	Target 5 cm x 5cm in carta	Target 5 cm x 5cm in carta giapponese

Tab 3.6 tipologia di target, Il test (utilizzati nel presente lavoro di tesi).

supporti.

Il piano di conservazione programmata pone le basi sul concetto di monitoraggio, effettuato in questo caso con un duplice obiettivo:

Studiare e analizzare i movimenti e le deformazioni che affliggono i sistemi supporti-affreschi staccati in relazione alle diverse condizioni microclimatiche presenti nel chiostro durante le escursioni termo-igrometriche stagionali;

Offrire ai proprietari ed ai gestori del Patrimonio Culturale,

nonché alle istituzioni a vario titolo interessate, uno strumento di supporto decisionale, nella forma di un sistema di monitoraggio che consenta al responsabile del singolo bene di poter attivare le necessarie procedure operative e gli interventi conservativi necessari a salvarli.

In tabella 3.7 sono illustrate le diverse campagne di rilievo, le tecniche utilizzate durante ogni campagna, l'oggetto rilevato e le rispettive finalità.

3.8.1 Tempo 0 (Luglio 2021)

Nel mese di Luglio 2021, corrispondente al tempo zero (T0), è stata svolta la prima campagna di rilievo digitale integrato. Essa ha previsto:

- Rilievo laser scanner, effettuato con *Laser Faro Focus 3D M70* con camera digitale integrata nel chiostro Verde e annesso cappellone degli Spagnoli (Fig. 3.13). In totale sono state realizzate 24 scansioni, utilizzando una risoluzione 1/5 e una qualità 4x, in modo da svolgere una scansione veloce (4' 46" per l'acquisizione della nuvola di punti) con una risoluzione di 7.7 mm/10 m. Le prime due scansioni realizzate all'ingresso del chiostro sono state acquisite in modalità b/n data la mancanza di affreschi oggetto di studio, mentre le restanti 22 scansioni sono tutte a colori;
- Rilievo fotogrammetrico SfM su tutti gli ambienti del chiostro Verde, cappellone degli Spagnoli e sala museale (ex-refettorio) del Museo di Santa Maria Novella, dove sono conservati di affreschi di Paolo Uccello e bottega, precedentemente collocati nel lato Est del chiostro



Fig. 3.11 applicazione dei target in carta giapponese su superfici dell'affresco "La creazione di Eva" conservato nella sala museale.

Verde;

- Rilievo termografico sugli affreschi lato Ovest e Est del chiostro e su quella conservati nella sala museale;
- Inserimento dei *target*;
- Rilievo topografico, effettuato solamente nella sala museale.

File	Modifica	Formato	Visualizza	?
P200	0.000	0.000	0.000	
P100	0.000	4.544	0.004	
P300	-3.494	-5.415	-0.016	
D201	-3.631	-1.882	0.640	
D202	-3.631	-1.870	1.449	
D203	-2.151	1.948	0.457	
D204	-2.102	2.085	2.041	
D205	1.071	4.453	1.542	
D206	6.218	2.403	0.356	
D207	6.601	2.272	1.772	
D208	6.038	1.623	0.079	
D209	6.794	1.628	0.507	
D210	6.699	1.389	2.133	
D211	4.890	-3.168	1.337	
D212	4.953	-3.008	1.464	
D213	4.899	-3.142	1.768	
D214	2.409	-7.380	0.064	
D215	2.259	-8.081	0.553	
D216	2.330	-8.117	2.165	
D217	-2.909	-6.026	0.333	
D218	-3.078	-5.969	1.656	

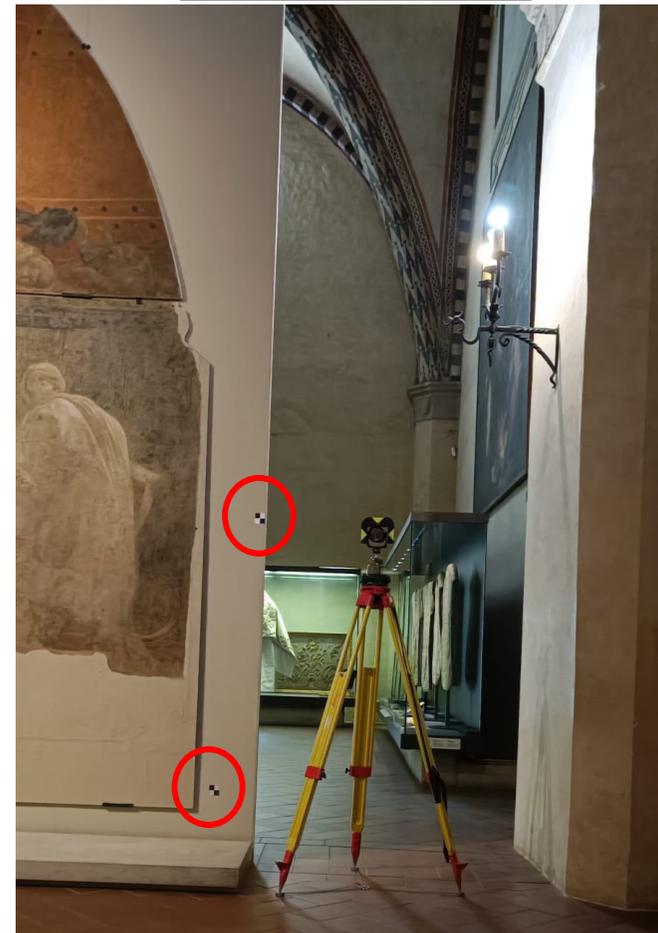


Fig. 3.12 localizzazione target presso sala museale SMN e geo-referenziazione tramite stazione totale.

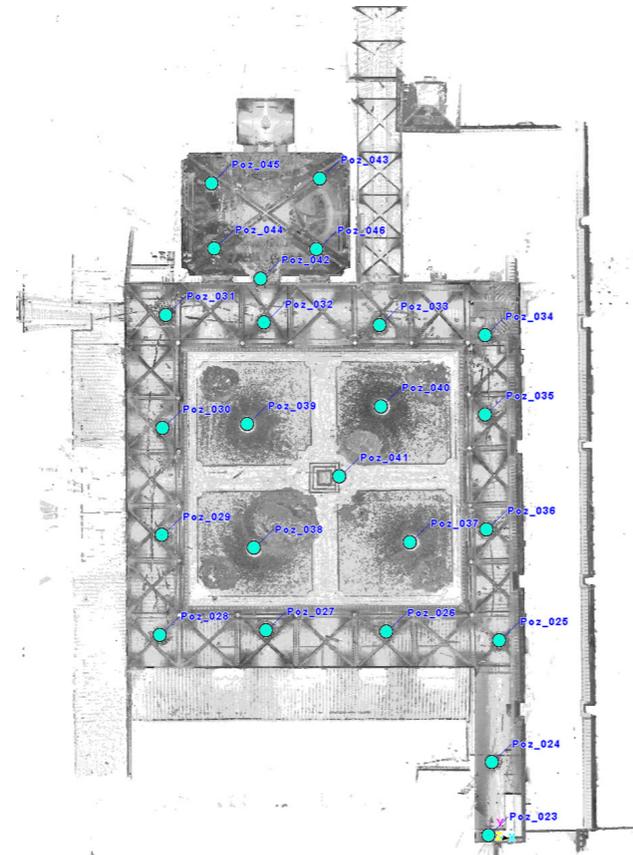
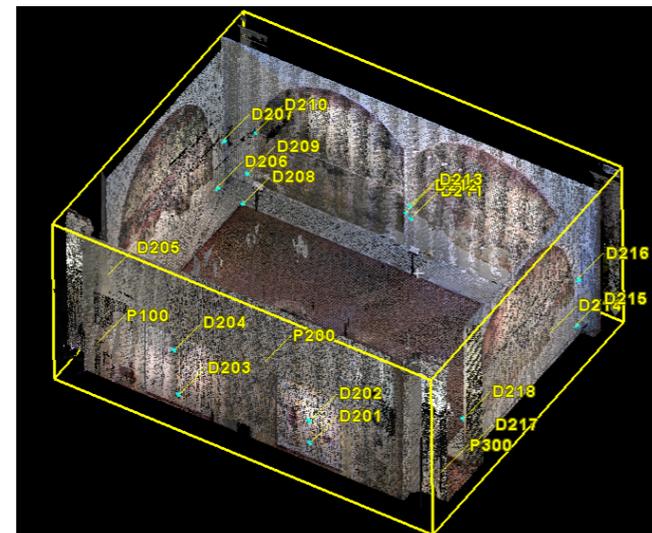


Fig 3.13 rilievo digitale laser-scanner del chiostro Verde effettuato a Luglio 2021, con indicazione della posizione delle singole scansioni e visualizzazione planimetrica della nuvola di punti.



Monitoraggio temporale	Tecnica di rilievo	Oggetto rilevato	Finalità
Tempo 0 (Luglio 2021)	Rilievo topografico (inserimento <i>target</i>)	Sala museale con affreschi del lato Est	Realizzazione di poligonali topografiche per ottenimento punti di controllo (<i>target</i>) utili sia in termini di spazio e di tempo (monitoraggio). I punti di controllo fungeranno come punti di vincolo per l'allineamento dei rilievi multi-scala.
	Laser scanner TLS <i>long-range</i>	Chiostro Verde e cappellone degli Spagnoli	Acquisizione delle informazioni geomorfometriche e quantificazione delle macro deformazioni dei supporti e degli affreschi (DEM).
	Fotogrammetria <i>SfM</i>	Affreschi lato Sud e Ovest del chiostro Verde e affreschi musealizzati	Realizzazione di modelli 3D integrati con <i>texture</i> e generazione di DEM.
	Termografia IR	Affreschi lato Sud e Ovest del chiostro Verde	Ricognizione sullo stato di conservazione dell'affresco e del supporto, con l'individuazione dei pannelli che lo costituiscono. Integrazione delle informazioni ottenute dai modelli laser scanner e fotogrammetrici al fine di ottenere modelli geo-morfometrici e radiometrici (generazione modelli IRT-3D).
Tempo 1 (Marzo 2022)	Laser scanner TLS <i>long-range</i>	Chiostro Verde, cappellone degli Spagnoli, cappella degli Ubrichi, sale ex-refettorio, porzione adiacente al chiostro dei Morti, chiostro Dati e facciata della chiesa di Santa Maria Novella	Acquisizione delle informazioni geomorfometriche e quantificazione delle macro deformazioni dei supporti e degli affreschi (DEM).
	Fotogrammetria <i>SfM</i>	Affreschi lato Sud e Ovest del chiostro Verde e affreschi musealizzati	Realizzazione di modelli 3D integrati con <i>texture</i> e generazione di DEM
	Laser scanner CMA <i>close-range</i>	Cinque aree selezionate, di cui quattro sugli affreschi musealizzati ed una su un affresco del lato Ovest del chiostro Verde.	Acquisizione delle informazioni geomorfometriche e quantificazione delle micro-deformazioni e fessurazioni della superficie degli affreschi.
Tempo 2 (Ottobre 2022)	Laser scanner TLS <i>long-range</i>	Chiostro Verde e affreschi musealizzati	Acquisizione delle informazioni geomorfometriche e quantificazione delle macro deformazioni dei supporti e degli affreschi (DEM)
	Laser scanner CMA <i>close-range</i>	Cinque aree selezionate, di cui quattro sugli affreschi musealizzati ed una su un affresco del lato Ovest del chiostro Verde.	Acquisizione delle informazioni geomorfometriche e quantificazione delle micro-deformazioni e fessurazioni della superficie degli affreschi.

Tab 3.7 monitoraggio temporale (2021-2023) effettuato nel presente elaborato di tesi.

3.8.2 Tempo 1 (Marzo 2022)

Nel mese di Marzo 2022, corrispondente al tempo uno (T1), è stata svolta la seconda campagna di rilievo digitale integrato. Essa ha previsto:

- Rilievo laser scanner composto da 77 stazioni di ripresa, effettuato utilizzando il laser scanner *Imager Z+F 5016h* in modalità "high" con un tempo di scansione "high quality" (6' 44" per l'acquisizione della nuvola di punti) con una risoluzione di 6 mm/10 m. Il rilievo è stato eseguito presso il chiostro Verde e tutte le sale dell'ex-

refettorio, il cappellone degli Spagnoli, una porzione dell'adiacente chiostro dei Morti, fino ai locali destinati alla Misericordia e la facciata della chiesa di Santa Maria Novella (Fig 3.14 e 3.15);

- Rilievo con laser *Romer Absolute Arm*, effettuato su aree selezionate degli affreschi conservati presso la sala museale e su una porzione di affresco molto degradato nel lato Ovest del chiostro Verde;
- Rilievo fotogrammetrico su affreschi lato Ovest e Sud del chiostro Verde e affreschi nella sala museale.

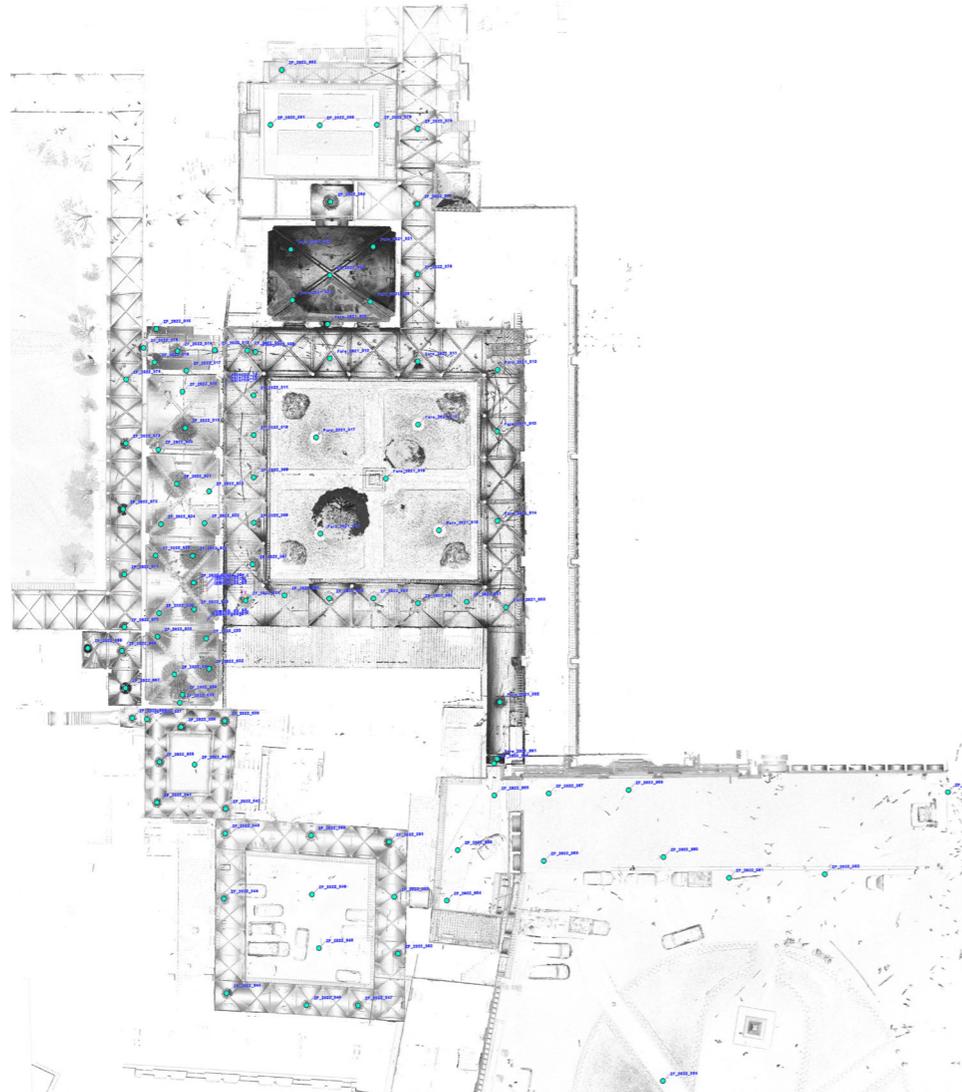


Fig. 3.14 rilievo digitale laser-scanner del chiostro Verde effettuato a Marzo 2022, con indicazione della posizione delle singole scansioni e visualizzazione planimetrica della nuvola di punti.

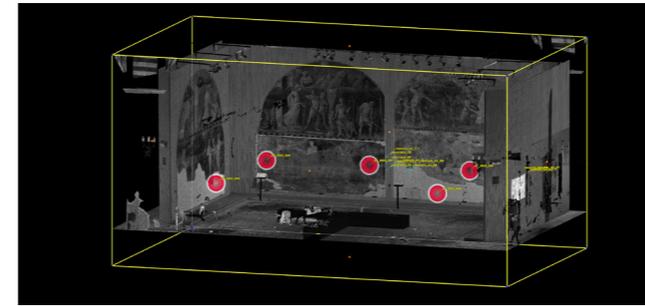


Fig. 3.15 rilievo digitale laser-scanner sugli affreschi musealizzati effettuato a Marzo 2022, con indicazione della posizione delle singole scansioni.

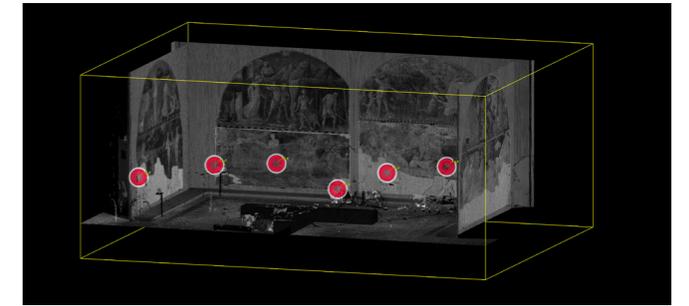


Fig. 3.17 rilievo digitale laser-scanner sugli affreschi musealizzati effettuato ad Ottobre 2022, con indicazione della posizione delle singole scansioni.

3.8.3 Tempo 3 (Ottobre 2022)

Nel mese di Ottobre 2022, corrispondente al tempo due (T2), è stata svolta la terza campagna di rilievo digitale integrato. Essa ha previsto:

- Rilievo laser scanner composto da 20 stazioni di ripresa, effettuato utilizzando il laser scanner *Imager Z+F 5016h* in modalità "high" con un tempo di scansione "high quality" (6' 44" per l'acquisizione della nuvola di punti) per una risoluzione di 6 mm/10 m. Il rilievo è stato

eseguito presso il lato Ovest e Sud del chiostro Verde e presso la sala museale con gli affreschi conservati (Fig 3.16 e 3.17);

- Rilievo con laser *Romer Absolute Arm close-range*, effettuato su aree selezionate degli affreschi conservati presso la sala museale e su una porzione di affresco molto degradato nel lato Ovest del chiostro Verde.

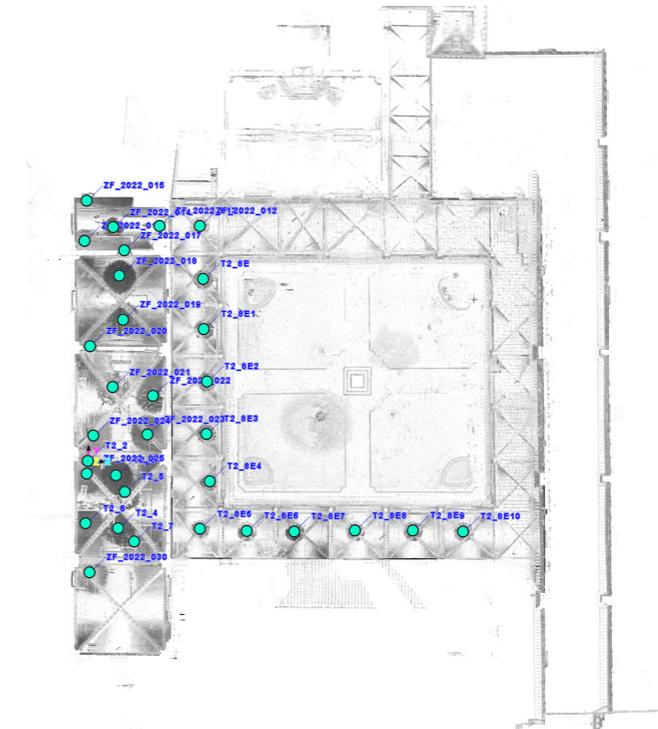
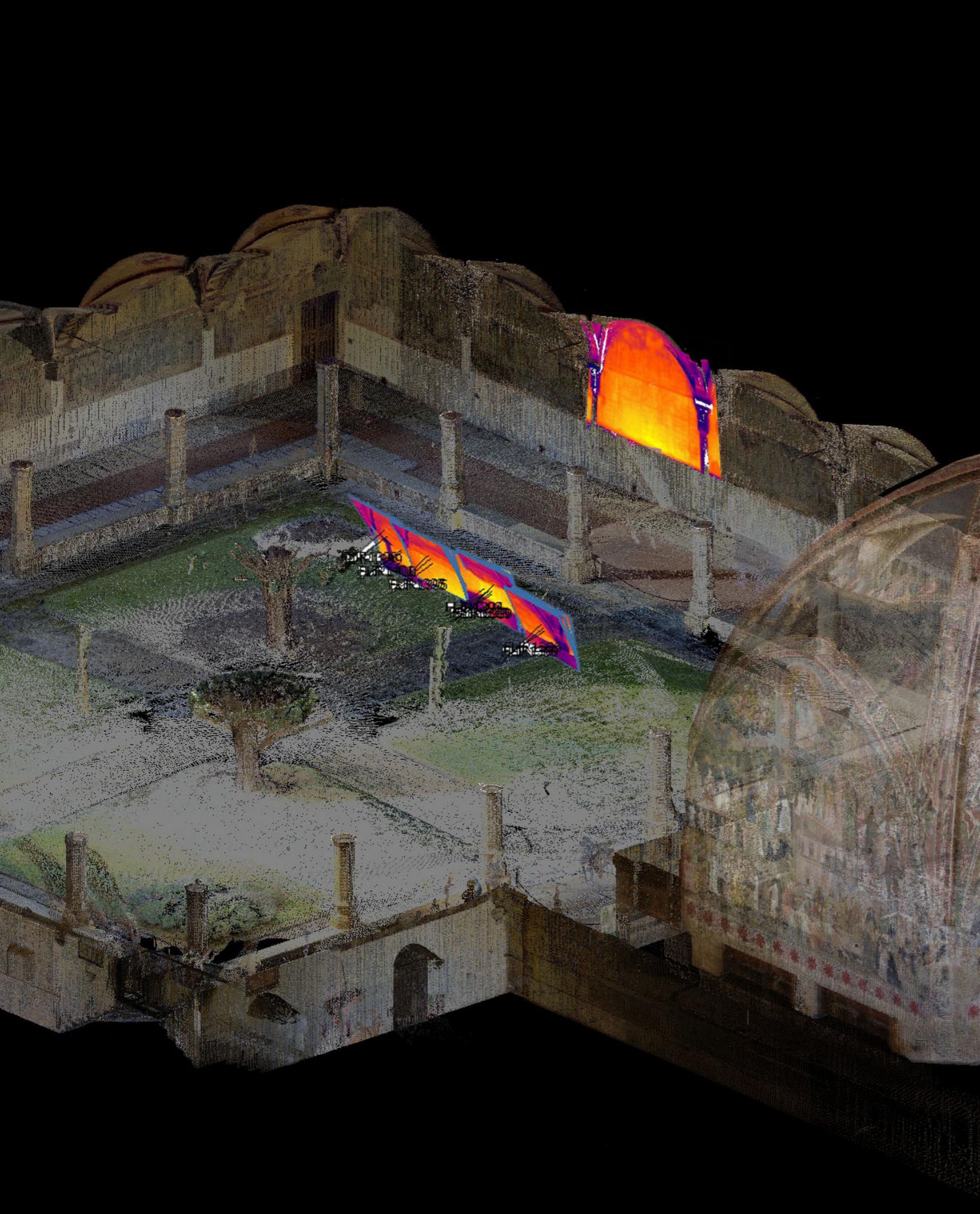


Fig. 3.16 rilievo digitale laser-scanner del chiostro Verde effettuato ad Ottobre 2022, con indicazione della posizione delle singole scansioni e visualizzazione planimetrica della nuvola di punti.



CAPITOLO 4

INTEGRAZIONE DEI DATI TERMOGRAFICI AL RILIEVO DIGITALE:
GENERAZIONE DI NUVOLE DI PUNTI 3D TERMICHE

CAPITOLO 4

INTEGRAZIONE DEI DATI TERMOGRAFICI AL RILIEVO DIGITALE INTEGRATO:

GENERAZIONE DI NUVOLE DI PUNTI 3D TERMICHE

Nell'ambito della conservazione del patrimonio costruito, la termografia a infrarossi (IRT) è una preziosa tecnica di monitoraggio non invasiva, che conduce all'identificazione di fenomeni rilevabili solo nella gamma IR dello spettro elettromagnetico. Il rilievo mediante IRT di facciate di edifici storici, monumenti o manufatti è ampiamente diffuso nell'ambito della conservazione del Patrimonio Culturale. Il rilievo delle proprietà termiche delle superfici è di estremo interesse e utile per l'individuazione di difetti nella muratura, infiltrazioni d'acqua, distacchi, rifacimenti o umidità di risalita capillare. La possibilità di integrare le informazioni IRT con i modelli VIS 3D è dovuta alla necessità di localizzare i difetti evidenziati sul termogramma e ottenere informazioni in scala reale relative alle proprietà termiche delle superfici d'interesse. Nel presente lavoro viene descritta la procedura per la creazione di nuvole di punti IRT mediante l'elaborazione fotogrammetrica di immagini termiche IRT con le nuvole di punti VIS ottenute dallo stesso dispositivo (termocamera) o da macchina digitali con una maggiore risoluzione. Il flusso di lavoro proposto implementa l'acquisizione delle immagini IR e permette la loro conversione in immagini tiff 32 bit a banda singola tramite un *plugin* del *software Image J* che, dopo l'elaborazione delle immagini termiche, consente di estrarre i dati *raw* e di calcolare la distribuzione della temperatura assoluta. Le immagini IR ottenute sono così direttamente disponibili per l'elaborazione con un *software* di *modelling* fotogrammetrico 3D (*Agisoft Metashape*, in questo caso) per la realizzazione di modelli IRT-3D. Oltre ai consolidati metodi di *Data fusion* tra immagini termiche e *set* di dati derivanti da nuvole laser o fotogrammetriche, in questa tesi viene dunque dimostrato che è possibile ottenere nuvole di punti 3D RGB e IR "native" utilizzando unicamente la termocamera ad infrarossi, in grado di acquisire al contempo immagini IR e RGB (per questa applicazione si vede il caso di studio di palazzo Lenzi, mostrato nel Capitolo 6). Le mappe termiche possono essere localizzate nel sistema di coordinate con elevata precisione e se ne può determinare la scala, l'area o il volume. Il metodo è stato validato eseguendo il rilievo degli affreschi del chiostro Verde, ma anche in altri casi di studio emersi dalle attività di ricerca svolte in collaborazione tra dipartimento di architettura di Firenze (DIDA) e Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC-CNR) di Sesto Fiorentino, quali le facciate di palazzo Lenzi

in piazza Ognissanti (Firenze), il monastero di Saint Miquel d'Escornalbou a Tarragona (Spagna) e il castello-fortezza di Trogir (Croazia), che verranno trattati approfonditamente nel Capitolo 6.

4.1 Stato dell'arte per l'integrazione di modelli VIS e IR

La termografia a infrarossi (IRT) è diventata uno strumento consolidato per la diagnostica degli edifici, in grado di produrre misure rapide, in tempo reale e facilmente interpretabili delle caratteristiche termiche di un edificio (El Masri e Rakha 2020), (Tejedor et al. 2022). In particolare, l'applicazione dell'IRT al Patrimonio Culturale ha permesso l'identificazione di tecniche di costruzione storiche, materiali e strutture subsuperficiali (Glavaš et al. 2019) e la valutazione di beni architettonici e siti archeologici (Cadelano et al. 2015) costituendo così un'importante guida per pratiche di restauro, campionamento o consolidamento (Brizzi, Cantisani, e Riminesi 2022). Mentre l'IRT ha dimostrato la sua competenza come tecnica NDT *stand-alone*, un crescente numero di ricerche sta cercando di sfruttare le emergenti tecniche di visione fotogrammetrica e le tecniche di ingegneria topografica per fondere insieme di dati 2D e 3D-NDT complementari di edifici storici (Lin et al. 2019). Negli ultimi due decenni, la generazione di modelli 3D a partire da fotogrammetria SfM e dalla Scansione Laser Terrestre (TLS) è diventato un processo consolidato per la documentazione del Patrimonio Culturale, fondendo dati spettrali e spaziali per generare rappresentazioni digitali del Patrimonio Architettonico. La fusione dei dati, secondo la definizione di S. Chane, è «il processo di combinazione di insiemi di dati di diversa origine (sensori e risoluzione) in un prodotto unificato» (Chane et al. 2013). La ricerca sull'unione dei dati ha cercato di classificare la fusione dei dati 2D e 3D in base a livelli basati sullo scopo, sui dati e sulle dimensioni dell'oggetto da rilevare. La fusione dei dati radiometrici e geometrici per il Patrimonio Architettonico rafforza il loro uso individuale, consentendo di interpretare edifici complessi con maggiore obiettività e rigore (Adán et al. 2020). Nonostante la fusione di dati 3D sia stata descritta ampiamente in letteratura (Adamopoulos et al. 2020), (Rodríguez-González et al. 2017), (Adamopoulos e Rinaudo 2021), è necessaria

una revisione sistematica dei metodi e delle applicazioni, in particolare per quanto riguarda l'integrazione dell'IRT in un unico prodotto interpretabile. Concettualizzata nella Fig. 4.1, la ricerca sulla termografia a infrarossi 3D-*data fusion* (IRT-3DDF) ha iniziato a dimostrare la sua efficacia nel settore AEC (*Architecture, Engineering and Construction*), con studi che cercano di superare la bassa risoluzione spaziale intrinseca della termografia sviluppando metodi che correggano le distorsioni dell'immagine, identifichino le caratteristiche comuni e registrino le immagini tramite i rilievi *reality-based*, (Kylili et al. 2014) (Fig 4.2). I recenti sviluppi dei *software* commerciali *Structure from Motion* hanno aperto la strada alla possibilità di creare nuvole di punti dense partendo direttamente da immagini IRT e RGB non ordinate e non calibrate (Grechi et al. 2021). In particolare, negli ultimi anni sono state create nuvole di punti nell'infrarosso termico combinando diverse tecniche geomatiche (unendo immagini termiche, nuvole di punti di scansione laser e dati fotogrammetrici tradizionali a colori RGB) che possono supportare efficacemente le analisi per lo studio degli edifici del Patrimonio Culturale (Giacomo Patrucco et al. 2022). La bassa risoluzione spaziale intrinseca delle immagini termiche ha infatti richiesto metodi di fusione con immagini

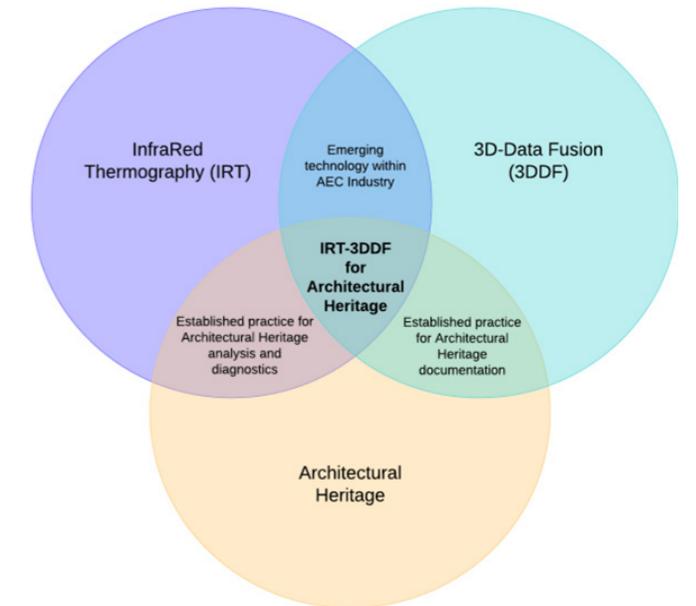


Fig. 4.1 mappa dell'interconnessione tra termografia a infrarossi (IRT), fusione di dati 3D (3DDF) e ricerca sul Patrimonio Architettonico. (Sutherland et al. 2023).

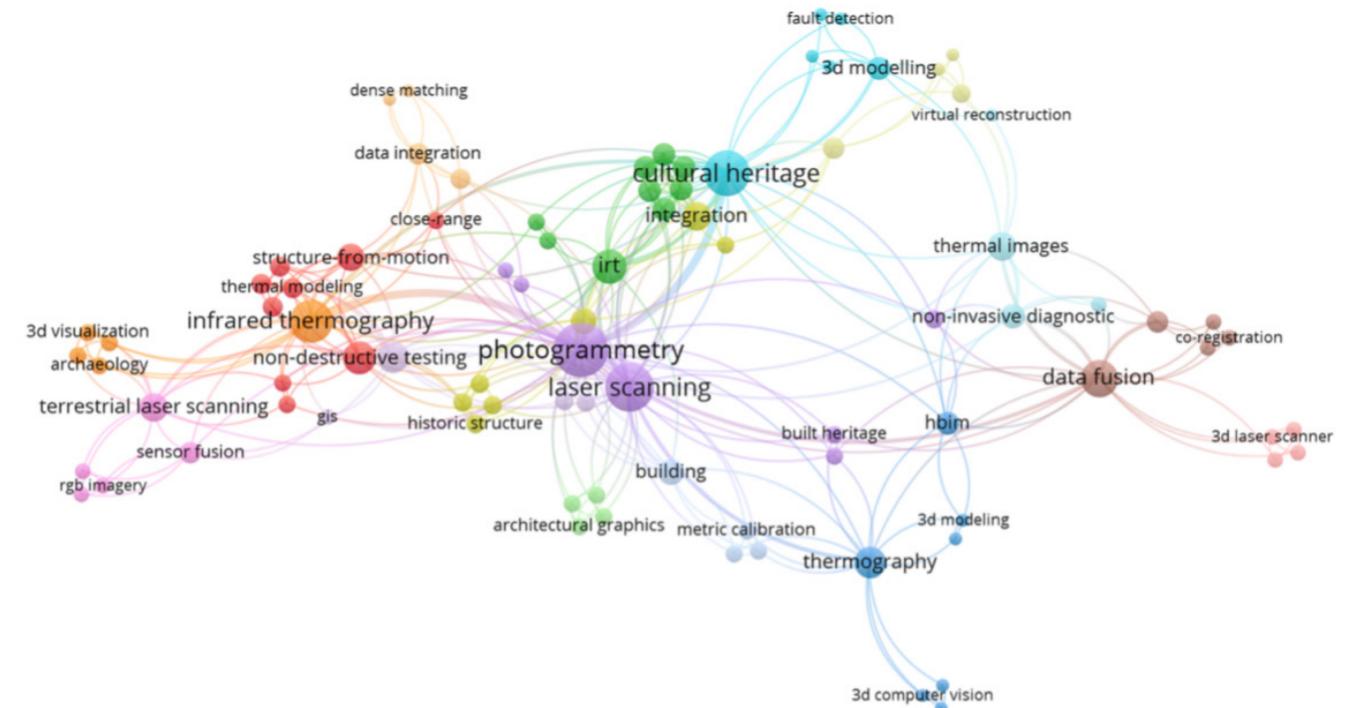


Fig. 4.2 Co-occorrenza delle parole chiave di IRT-3DDF. Questa figura rappresenta le parole chiave collegate presenti nella letteratura di scoping, visualizzate con il metodo di normalizzazione di VOSviewer, (Sutherland et al. 2023).

di altri set di dati in grado di fornire geometrie più accurate del Patrimonio Architettonico. In letteratura viene dunque affermato che per una corretta indagine della storia di un edificio con diversi cambiamenti costruttivi nel tempo, è fortemente suggerita la combinazione di diverse tecniche di sensori (Barsanti et al. 2014), (Dabetwar et al. 2022). Anche i recenti sviluppi di *hardware* e *software* hanno contribuito alla progressione e sviluppo di modelli IRT-3D, con i flussi di lavoro fotogrammetrici al centro di questa progressione. Lo studio di Alba et al. (Alba et al. 2011), nel quale è stato utilizzato un sistema “bi-camera”, rappresenta un punto critico in questo panorama in quanto accoppia una fotocamera *Digital Single-Lens Reflex* (DSLR) e una IRT in un sistema fisso. Elaborando le immagini RGB della DSLR attraverso una regolazione del fascio fotogrammetrico, con l’orientamento relativo della telecamera IRT, le immagini termiche possono essere orientate e allineate a un modello TLS. In questo caso, le immagini RGB non vengono utilizzate per fornire la geometria 3D, ma per determinare l’orientamento esterno delle immagini termiche, dimostrando il vantaggio di più sensori 2D in un sistema fisso.

Con lo sviluppo di termocamere che integrano sensori RGB nello stesso alloggiamento, il lavoro di Alba et al. dimostra i punti di forza dello sfruttamento delle immagini RGB integrate (e supplementari) per determinare l’orientamento dell’immagine termica. In quest’ottica lo sviluppo di *software* fotogrammetrici è stato fondamentale per l’aumento della capacità e dell’automazione dei metodi di fusione basati sulle immagini utilizzando una geometria derivata da RGB per registrare le immagini IRT. Questi metodi si basano sull’identificazione manuale di punti comuni tra immagini RGB e IRT (Mileto, Vegas, e Lerma 2015), basati su flussi di lavoro semi-automatici (E. Adamopoulos et al. 2021) e su *pipeline* fotogrammetriche SfM completamente automatiche (Giacomo Patrucco et al. 2022).

Adamopoulos et al. (Adamopoulos et al. 2020) presentano una *pipeline* SfM semi-automatica che sfrutta il sensore RGB di una termocamera per registrare e texturizzare un modello 3D. Registrando immagini IRT e RGB non distorte, viene creata una *texture* termica sostituendo le immagini IRT al posto delle corrispondenti immagini RGB, consentendo di mantenere la geometria del blocco e di ottenere una *texture* termica (Fig. 4.3).

Tramite un metodo completamente automatizzato, Patrucco et al. (G. Patrucco et al. 2022) hanno valutato l’efficacia di due distinti flussi di lavoro SfM su diversi beni architettonici, esportando l’orientamento relativo di un sensore RGB per

generare nuvole di punti termici. Rispetto a una *pipeline* SfM standard che utilizza immagini IRT (*workflow* 1), i metodi di fusione che sfruttano le immagini RGB e IRT (*workflow* 2) hanno dimostrato livelli di confidenza maggiori, specialmente per gli edifici variabili dal punto di vista strutturale (Fig. 4.4).

I progressi dei *software* fotogrammetrici stanno ottimizzando l’automazione dell’IRT-3DDF per i progetti di beni architettonici, e mentre *software* come *Agisoft Metashape* stanno evidenziando la possibilità di generare modelli termici solo da immagini IRT, la fusione con immagini RGB o TLS è fondamentale per fornire l’accuratezza geometrica necessaria per estrarre prodotti e informazioni.

Gli approcci IRT-3DDF per la texturizzazione di prodotti 3D da dati TLS hanno mostrato sviluppi simili che aumentano l’automazione, l’accuratezza e la copertura del Patrimonio Architettonico. Cabrelles et al. (Cabrelles et al. 2009) hanno sfruttato un metodo di esportazione sistematica dell’immagine sfruttando la trasformazione lineare diretta, la collinearità e i parametri di distanza principale, per registrare le immagini su una maglia TLS. Analogamente, Costanzo et al. (Costanzo et al. 2014) hanno rettificato gli orto-mosaici termici per allineare una *texture* termica su una maglia di riflettanza 2D-TLS, consentendo una valutazione completa delle deformazioni strutturali (Fig. 4.5)

Tuttavia, le limitazioni significative di queste metodologie risiedono: *i)* nella lunga elaborazione di singole immagini; *ii)* nella difficoltà di identificare punti comuni in immagini

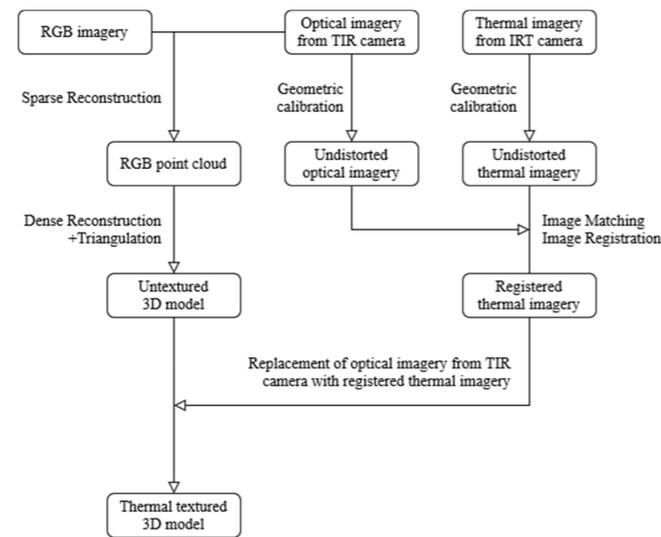


Fig. 4.3 workflow del mapping 3D termico proposto da (Adamopoulos et al. 2020).

che presentano segnali termici non uniformi; *iii)* nelle discontinuità nel *texturing* applicato ai modelli 3D.

Per combattere queste sfide, l’emergere di sistemi di termografia tridimensionale (TTIS- *Three-dimensional Thermal Imaging Systems*), che prevedono soluzioni di scansione che includono uno scanner laser, una telecamera RGB e una telecamera IRT, consentono di co-gestire i prodotti sfruttando la posizione e il campo visivo di uno scanner. Merchan et al. (Merchán et al. 2018) hanno acquisito, con uno scanner laser 3D *Riegl*, una *Nikon D90* e una *FLIR AX5*, determinando la matrice di trasformazione proiettiva delle immagini termiche utilizzando marcatori identificabili e consentendo la copertura completa del bene sotto indagine. Allo stesso modo, il metodo 3D-TCV (*Thermal Computer Vision*) di Adan et al. (Adán et al. 2021), ha permesso di allineare le diverse scansioni TLS con i relativi ortomosaici termici per dimostrare l’efficacia dell’IRT-3D per il

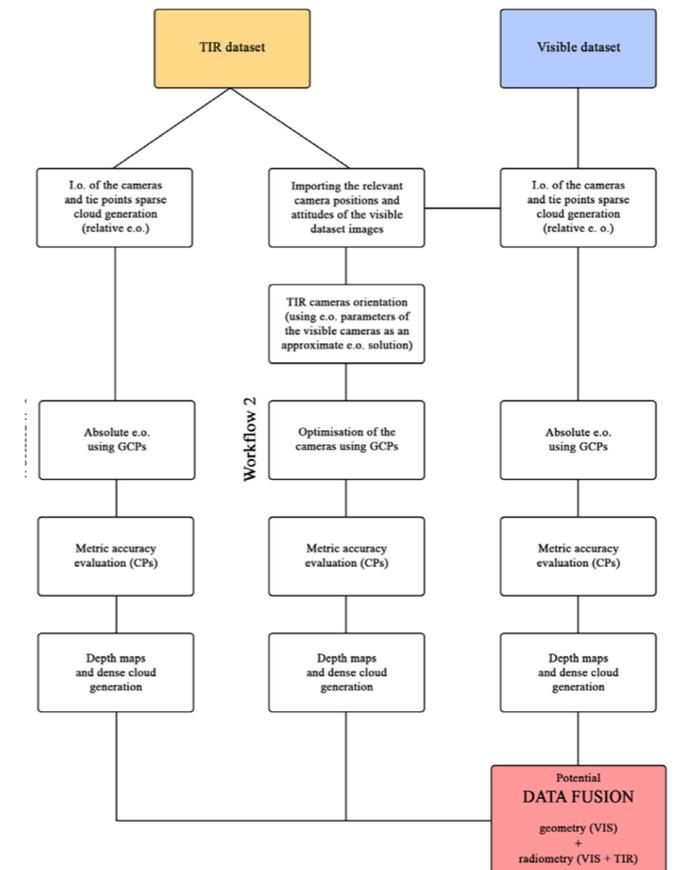


Fig. 4.4 workflow proposto da Patrucco et al, 2022.

monitoraggio ambientale del Patrimonio Architettonico. In questo caso, lo sfruttamento di modelli IRT-3D consente: *i)* la localizzazione precisa delle discrepanze termiche; *ii)* una valutazione olistica del *comfort* termico che incorpora la temporalità; e *iii)* l’accoppiamento dei dati quantitativi dei sensori con i dati termici qualitativi. I metodi che sfruttano il TTIS hanno dimostrato che la ricchezza dei dati registrati può fornire valutazioni complete del Patrimonio Architettonico, confermando l’idoneità dei sistemi di gestione delle informazioni per interpretare e gestire i dati (Sutherland et al. 2023).

La fusione di immagini IRT con modelli parametrici 3D rappresenta un’evoluzione significativa dell’IRT-3D in quanto fornisce elementi utili per il *Building Information Modeling* (BIM), dedicato al monitoraggio e alla gestione del Patrimonio Architettonico. Solla et al. (Solla et al. 2020) hanno utilizzato *Autodesk Revit* per allineare immagini IRT, GPR (*Ground Penetrating Radar*) e mappe di classificazione all’interno di un ambiente *Historical or Heritage Building Information Modeling* (H-BIM). Questa combinazione dimostra l’efficacia dell’integrazione di dati NDT multipli per la diagnostica degli edifici e la gestione continua. Inoltre, Patrucco et al. (Patrucco et al. 2022) evidenziano come la combinazione tra mappatura di disegni storici, piani CAD,

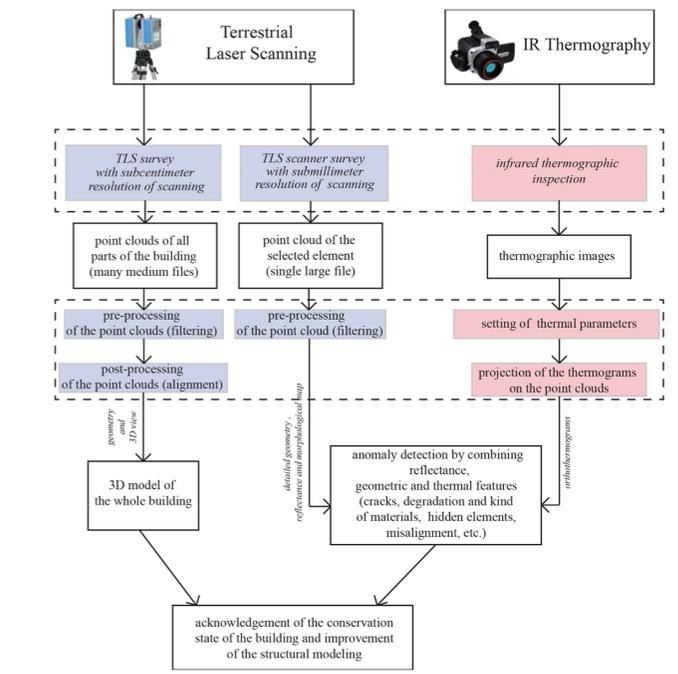


Fig. 4.5 workflow utilizzato per integrare i risultati della termografia IR a dati TLS in Costanzo et al, 2014.

mappe T-BIM e orto-mosaici IRT permetta di magnificare il potenziale diagnostico, trovando elementi nascosti, modifiche storiche e anomalie termiche sulle facciate degli edifici. L'importanza dei metodi IRT-3D che sfruttano i software BIM risiede inoltre nella capacità di creare repository, in cui sono visibili sia lo spazio che le modifiche storiche e le anomalie termiche delle facciate degli edifici. Tuttavia, è necessario fare delle considerazioni quando si utilizzano i metodi BIM per l'IRT-3D, tenendo conto dell'accuratezza del modello, dell'esperienza dell'utente e degli standard BIM per il Patrimonio Architettonico. In sintesi, la scelta di IRT-3D deve valutare: *i)* la scala del progetto, *ii)* il dettaglio richiesto della geometria di base, *iii)* l'attrezzatura di cui si dispone, *iv)* le applicazioni dei prodotti derivati per l'implementazione efficace del Patrimonio Architettonico.

4.2 Acquisizioni delle immagini termiche

In questo lavoro di tesi viene mostrato un metodo diretto di elaborazione dei termogrammi, basato su software open source che forniscono immagini a singola banda utilizzabili per processi fotogrammetrici. Inoltre viene dimostrato che oltre ai consolidati metodi di fusione delle immagini termiche con immagini derivanti da altri set di dati, è possibile creare anche nuvole di punti 3D RGB e IR solo con l'aiuto della termocamera ad infrarossi, che può acquisire non solo immagini IR ma anche RGB. In particolare nel momento dell'acquisizione mediante termocamera, le immagini vengono registrate utilizzando la funzione *Multi-Spectral Dynamic* (MSX). Le immagini MSX contengono le componenti dello spettro infrarosso di un'immagine, ma anche le caratteristiche rilevanti dello spettro visibile, utili per migliorare la nitidezza di linee e bordi e ridurre la sfocatura delle immagini (Puliti, Montaggioli, e Sabato 2021). Utilizzando lo stesso dispositivo è possibile dunque correlare contemporaneamente i dati IR e VIS, ottenendo un'acquisizione rapida ed economica. In questo modo vengono inoltre minimizzate le possibili fluttuazioni termometriche che possono verificarsi tra i diversi rilievi e i diversi scatti. Inoltre gli errori di compensazione o di orientamento tra i sensori IR e VIS sono trascurabili grazie alla stessa posizione del punto di ripresa e alla stessa risoluzione dei pixel. Da quanto emerge in letteratura (Lin et al. 2018), (Dlesk, Vach, e Pavelka 2022), (Lagüela et al. 2012), per affrontare il processo fotogrammetrico i termogrammi IR grezzi devono essere pre-processati partendo dall'immagine raw pancromatica (in cui il numero digitale incluso in

ogni pixel rappresenta la temperatura assoluta rilevata) che viene convertita per mezzo di filtri adattivi o altri algoritmi di normalizzazione del contrasto in un .jpg "renderizzato", in cui l'intervallo di temperatura è rappresentato attraverso una tavolozza predefinita di falsi colori espressa in canali RGB (compositi o in scala di grigi). Dopo la creazione della nuvola densa IRT, l'equazione iniziale utilizzata per la trasformazione dei valori radiometrici viene poi nuovamente impiegata per recuperare i valori effettivi di temperatura dalle intensità RGB. È da notare che questo tipo di trasformazione altera i valori radiometrici delle immagini rispetto a quelli originali, rendendo necessaria, per l'analisi quantitativa, la sostituzione del dataset trasformato con quello originale nella fase finale di orto-rettifica (Conte, Girelli, e Mandanici 2018). In questa tesi le immagini raw FLIR sono trasformate direttamente in file TIF 32 bit, in cui in ogni pixel i dati di temperatura sono registrati e raccolti utilizzando un singolo canale spettrale. Questa operazione rende le immagini IR direttamente disponibili per il processo fotogrammetrico, senza alcuna trasformazione preliminare e conversione in immagini multi-canale.

Il dispositivo utilizzato per l'indagine IRT è la termocamera a infrarossi FLIR T540. La termocamera opera nell'intervallo spettrale 7,5-14,0 µm, ha una sensibilità termica di (NETD) <30 Mk a 30 °C (lente ottica di 42°) di 50mK, un intervallo di temperatura da -20 °C a +350 °C, una precisione di temperatura di ± 2°C e un sensore microbolometrico non raffreddato (le specifiche del dispositivo sono riportate nella nel paragrafo 3.5, Capitolo 3). La termocamera T540 acquisisce non solo le immagini IR, ma anche le immagini RGB grazie a due sensori indipendenti, un sensore IR e un comune CCD (Charge-Coupled Device) per il VIS. In questo modo è possibile acquisire al contempo l'immagine termica e la corrispondente nello spettro visibile. Di solito le immagini RBG ottenute da una termocamera non vengono utilizzate per casi applicativi a causa della loro bassa risoluzione (348 x 464 pixel, la stessa delle immagini termiche), tuttavia è stato osservato che le immagini visibili possono essere utilizzate come un valido strumento per la creazione di un modello RGB, per il riconoscimento del punto di ripresa delle immagini IRT a supporto del modello IRT e per una co-registrazione dei due modelli (Hoegner et al. 2016). L'approccio di creazione della nuvola visibile RGB tramite termocamera verrà utilizzato per il caso di studio di palazzo Lenzi a Firenze, come mostrato nel Capitolo 6.

Le immagini IRT sono state acquisite seguendo i criteri

adottati per la fotogrammetria SfM, ovvero alta convergenza e alta sovrapposizione (circa 60%), sia in orizzontale che in verticale, tra le fotografie progressive. In particolare, l'acquisizione IRT è stata condotta per gli affreschi conservati nel chiostro Verde, per l'individuazione della struttura del supporto in modo non invasivo – evitando dunque il loro smontaggio dalla muratura – e per la definizione del loro stato di conservazione (Fig. 4.6 e 4.7). Il rilievo termografico non è stato acquisito per gli affreschi conservati nella sala museale a causa del sistema di illuminazione fisso della sala che disturbava eccessivamente la corretta lettura dei termogrammi e in quanto già a conoscenza del loro supporto tergale. Si riportano tuttavia nelle schede del capitolo 5.3.2 le ricostruzioni panoramiche mosaiccate dei singoli termogrammi effettuati durante una campagna diagnostica del 2011, quando ancora gli affreschi del lato Est si trovavano ancorati alla muratura.

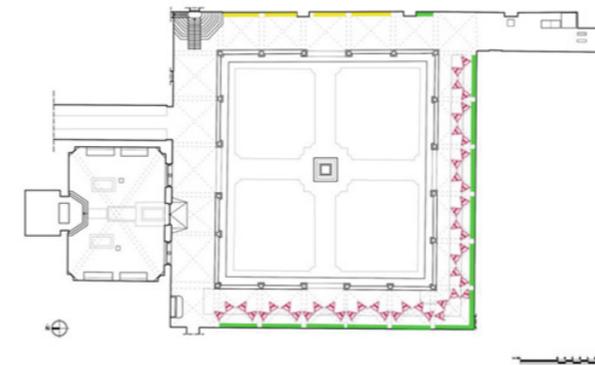


Fig. 4.6 in rosso, shooting termografico effettuato sugli affreschi del lato Sud e Ovest del chiostro Verde. In giallo, gli affreschi del lato Est, oggi musealizzati.



Fig. 4.7 acquisizione termogrammi durante le fasi di rilievo termografico, lato Ovest.

4.3 Data processing

Il metodo di calcolo della temperatura si basa sull'accesso ai dati raw del sensore ottenuti dalla termocamera. Nel caso delle termocamere FLIR, questi dati sono memorizzati in file JPG radiometrici aventi tag di metadati in formato "EXIF". Per visualizzare questi metadati viene utilizzato un plugin open source IRimage (<https://github.com/gpereyrairujo/IRimage>) che è stato implementato nel linguaggio macro del software di analisi scientifica delle immagini ImageJ (Rueden et al. 2017) o della sua distribuzione FIJI (<https://imagej.net/downloads>) (Schindelin et al. 2012). Questo plugin utilizza a sua volta il software open source ExifTool per estrarre i valori raw dalle immagini IRT. Il plugin è stato implementato e testato utilizzando le termocamere FLIR in grado di elaborare il formato radiometrico JPG di FLIR per le immagini termiche. In particolare, la funzione "Process" di IRimage è in grado di elaborare cartelle complete di immagini raw termiche. Il formato radiometrico JPG include parametri impostati dall'utente all'interno delle singole immagini quali emissività, temperatura e umidità dell'aria, temperatura riflessa e distanza dell'oggetto, che è possibile modificare in fase di data processing per una corretta elaborazione delle immagini IRT. In particolare, grazie al comando "process" si può utilizzare una delle tre opzioni seguenti (Fig. 4.8, a):

- elaborare ogni file utilizzando i parametri radiometrici memorizzati in ogni singola immagine (ad esempio, quando l'utente ha impostato correttamente e manualmente questi parametri nella fotocamera in base a condizioni specifiche per ogni immagine);
- utilizzare un insieme di parametri globali per tutte le immagini, utile quando tutte le immagini sono state acquisite nelle stesse condizioni o se i parametri devono essere modificati globalmente;
- utilizzare i parametri memorizzati in un file di testo, in cui è possibile definire parametri specifici (emissività dell'oggetto, distanza dell'oggetto, temperatura dell'aria, umidità relativa e temperatura riflessa apparente) per ciascuna immagine (questa opzione è stata utilizzata in questo lavoro).

I dati grezzi contenenti il segnale digitale del sensore vengono quindi estratti e la temperatura viene stimata per ogni pixel (Irujo 2022). Dopo l'elaborazione, le immagini

IRT vengono memorizzate e per ogni *file* di *input* vengono create le cartelle (Fig. 4.8, b) corrispondenti all'immagine in falsi colori (cartella "color"), ai dati *raw*, (cartella "raw"), alla cartella maschere (se presenti) e alla temperatura stimata (cartella "temp"). I valori dei *pixel* della temperatura stimata sono memorizzati anche come testo (cartella "text") che può essere aperto in un foglio di calcolo o in un *software* statistico. Inoltre, indipendentemente dall'opzione di

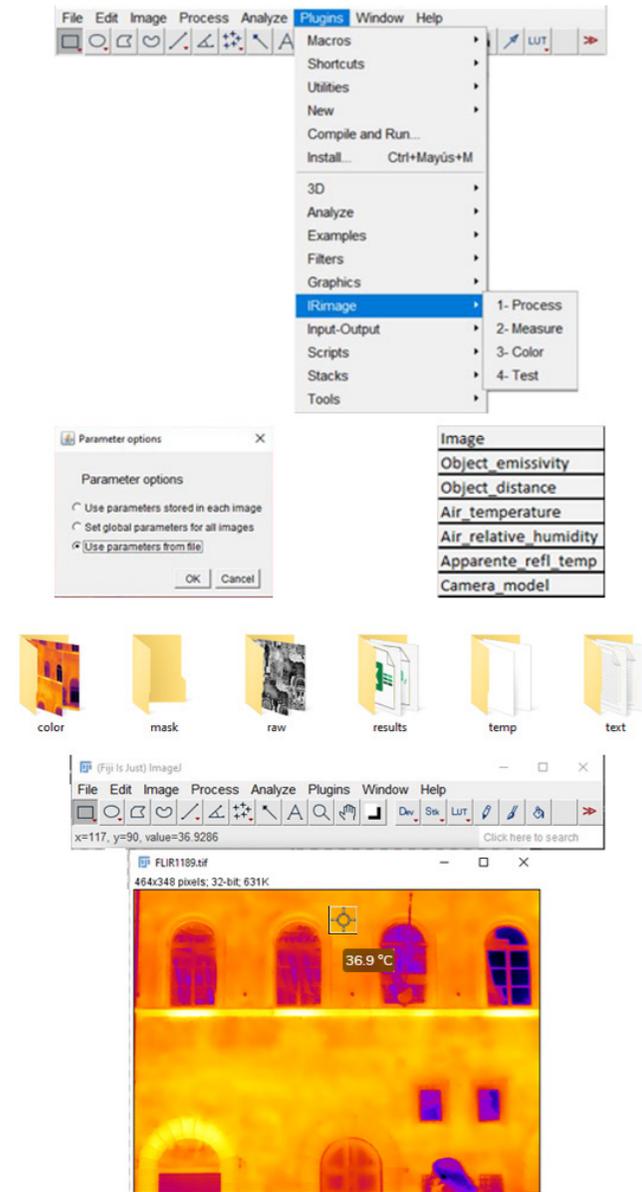


Fig. 4.8 data processing immagini IRT tramite IMAGEJ, plugin IRimage.

elaborazione selezionata, i parametri utilizzati (emissività, distanza dall'oggetto, temperatura e umidità relativa dell'aria, temperatura riflessa apparente) vengono memorizzati in un file di testo .csv (cartella "results") che può essere utilizzato in seguito per modificarne i valori e i risultati nelle immagini IR da elaborare (con l'opzione "Usa parametri da file", Fig. 4.8, a). Ciascuno di questi tipi di *file* di *output* è memorizzato in diverse sottocartelle all'interno della cartella selezionata dall'utente. Nella cartella "temp" (Fig. 4.8, c) che, come affermato sopra, contiene i valori di temperatura stimata in base ai parametri selezionati, le immagini IRT sono registrate in formato .TIF con canale a banda singola a 32 bit. Queste immagini sono matrici in cui per ogni *pixel* sono associate le coordinate X, Y e il valore assoluto della temperatura (°C) (Fig. 4.8, d).

4.4 Workflow fotogrammetrico SfM

La tecnica di fotogrammetria digitale *Structure from Motion* (SfM) rappresenta uno dei metodi più accessibili per raccogliere informazioni geometriche 2D e 3D di alta qualità a partire dall'acquisizione di una serie di immagini sovrapposte (Fonstad et al. 2013). La creazione del modello IRT è stata effettuata utilizzando il *software Agisoft Metashape 1.7.6*. Il flusso di lavoro utilizzato per le immagini IR (importate come file TIF 32 bit a singola banda) è il seguente:

1. *Uploading* delle foto;
2. Calibrazione della fotocamera. *Agisoft Metashape* generalmente non tratta con immagini a infrarossi, quindi è necessario effettuare una pre-calibrazione della fotocamera (Usamentiaga et al. 2017). Nel caso in cui le immagini di partenza manchino di dati EXIF o i dati EXIF siano insufficienti per calcolare la lunghezza focale in *pixel*, come in questo caso, *Metashape* assumerà una lunghezza focale pari a 50 mm. Tuttavia, se i valori iniziali differiscono significativamente dalla lunghezza focale reale, è probabile che il processo di allineamento non vada a buon fine. Pertanto, se le immagini non contengono meta-dati EXIF, è preferibile specificare manualmente la lunghezza focale (mm) e la dimensione dei *pixel* del sensore (mm). È possibile farlo nella finestra di dialogo *Camera Calibration* disponibile nel menù *Strumenti*. In genere, questi dati sono indicati nelle specifiche della fotocamera o possono essere ricevuti da qualche fonte *online*. Per indicare al programma che i parametri di orientamento della telecamera devono essere stimati in base alle informazioni sulla lunghezza focale e sulle dimensioni dei *pixel*, è necessario impostare il parametro *Type* della scheda iniziale sul valore *Auto*. In questo caso, la dimensione dei *pixel* del sensore e la lunghezza focale sono state calcolate in base alle caratteristiche della termocamera e alla distanza (in m) dall'oggetto che permette di stimare l'IFOV (*Istantaneous Field Of View*) corrispondente alla dimensione di un singolo elemento del rivelatore in mm o pollici (<https://support.flir.com/resources/>), Fig 4.9.
3. Allineamento delle foto (massima precisione);
4. Ottimizzazione delle camere (fit f, k1, k2, cx, cy, p1, p2), (Conte, Girelli, e Mandanici 2018);
5. Posizionamento dei punti di controllo a terra (GPCs). Per quanto riguarda questo aspetto, un problema ben noto legato all'uso dei punti di riferimento per le applicazioni fotogrammetriche che coinvolgono le immagini termiche è legato alle difficoltà di identificazione univoca dei tradizionali *marker* - spesso in carta o plastica - che vengono solitamente apposti sulle superfici rilevate e misurati con metodi topografici convenzionali. Questa criticità, come abbiamo visto precedentemente nel Capitolo 3, è stata risolta utilizzando marcatori composti da materiali a bassa emissività (ad esempio, l'alluminio, caratterizzato da un'emissività di $\approx 0,04-0,09$). Tuttavia, come riportato in Patrucco et al. (Patrucco et al. 2022), è possibile utilizzare anche punti estratti in quelle aree in cui il contrasto radiometrico tra materiali adiacenti ed elementi con diversa emissività consente il riconoscimento univoco dei punti selezionati anche in assenza di marcatori artificiali. Anche questa strategia è stata applicata in questa esperienza di ricerca sfruttando i punti naturali riconoscibili in VIS e IR, laddove il *target* di alluminio mancava o non era correttamente visibile. Questi punti sono stati utilizzati come GCP allo scopo di: *i*) registrare la nuvola di punti fotogrammetrici IR nello stesso sistema di riferimento locale dei dati RGB, *ii*) valutare l'accuratezza metrica dei risultati finali dopo il *bundle adjustment*.
6. Costruzione nuvola densa (massima accuratezza);
7. Trasformazione *raster*. Per visualizzare i valori assoluti di temperatura dalle immagini 32 bit è necessario definire la formula che trasformerà i valori di temperatura in un'immagine *raster* tramite la finestra di dialogo *Calcolatore raster* (Ham e Golparvar-Fard 2013). La formula può dipendere dal dispositivo termico utilizzato: in questo caso la banda di *output* delle immagini

corrisponde alla banda B1, cioè al singolo canale spettrale corrispondente al valore assoluto di temperatura (dati di *input*). L'istogramma in Fig. 4.10 corrisponde alla distribuzione della temperatura superficiale (in questo caso va da 29 ai 34 °C). Infine, per creare la rappresentazione in falsi colori dei dati termici, si imposta una tavolozza di colori - in questo caso creata ad imitazione della palette *Iron* della termocamera FLIR - in cui ai colori blu e giallo corrispondono, rispettivamente, la minima e la massima temperatura rilevata.

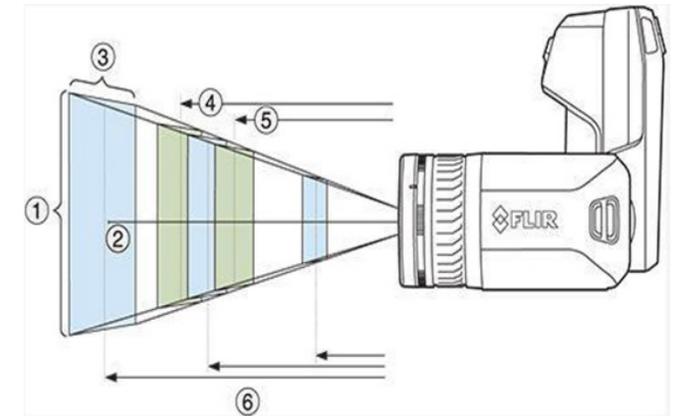


Fig. 4.9 1. Campo visivo verticale in metri; 2.Campo visivo istantaneo in mm e pollici; 3. Campo di vista orizzontale in metri; 4. Profondità di campo limite lontano in metri; 5. Profondità di campo limite vicino in metri; 6. Distanza dal target in metri.

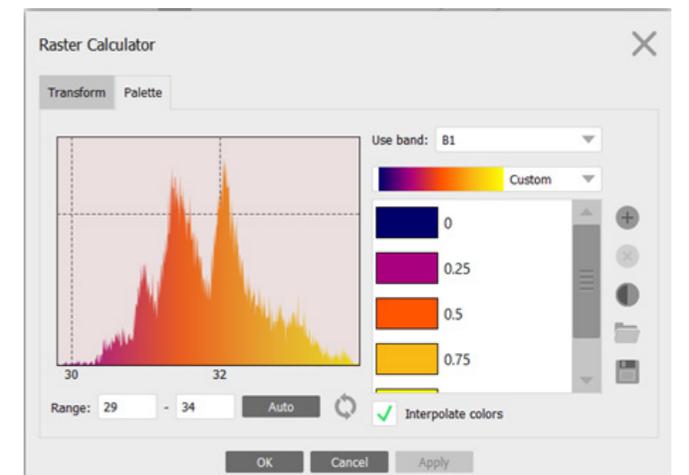


Fig. 4.10 calcolatore raster della distribuzione della temperatura assoluta.

4.5 Co-registrazione delle nuvole di punti RGB e IR tramite GPCs e verifica dell'allineamento

Come precedentemente anticipato, la bassa risoluzione spaziale delle immagini termiche può costituire un grave ostacolo alla corretta ricostruzione della geometria delle strutture rilevate, soprattutto per la generazione del modello solido 3D. Un'opzione per risolvere questa mancanza è l'integrazione di immagini termiche e ottiche [Ham e Golparvar-Fard 2013]. È possibile sfruttare la maggiore risoluzione geometrica e spaziale delle immagini tradizionali in *true-color* per generare una *mesh* 3D più dettagliata, accurata e topologicamente corretta, che può essere utilizzata con le seguenti finalità:

- superficie geometrica di riferimento (*mesh*) per il processo di texturizzazione del modello 3D ottenuto con i dati IRT;
- base per la generazione di orto-immagini termiche;
- riferimento per effettuare controlli morfo-metrici tra le due nuvole di punti (IR e RGB).

Per la creazione della nuvola RGB è stato utilizzato lo stesso flusso di lavoro delle immagini IRT, utilizzando gli stessi GPCs per la creazione della nuvola densa. Le due nuvole di punti (IR e ottica) sono state quindi allineate utilizzando i GPC, le cui coordinate sono state esportate dal rilievo laser scanner. Questa operazione risulta fondamentale per poter raggiungere le finalità di cui sopra. Per valutare se le nuvole di punti dense IRT sono state generate e co-registrate correttamente rispetto a quella di riferimento RGB e per stimare la loro accuratezza spaziale e geometrica, l'analisi delle distanze residue è stata eseguita utilizzando lo strumento "Compute Cloud/cloud distance" oppure utilizzando l'algoritmo "Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)" implementati nel software *CloudCompare*. Il plugin M3C2 misura la variazione media della superficie lungo la direzione normale e calcola esplicitamente un intervallo di confidenza locale. Inoltre, è stato eseguito un confronto tra le distribuzioni di temperatura delle immagini FLIR e della nuvola di punti IRT finale per valutare eventuali errori legati all'operazione di fusione eseguita da *Metashape*. L'istogramma delle frequenze è stato creato attraverso il software *MATLAB*®, esaminando aree relativamente piccole (circa 30 x 30 cm²) estratte sia dai termogrammi elaborati sia dalla nuvola di punti IR finale. Sono stati calcolati parametri statistici come la media e la deviazione standard di ogni distribuzione per ottenere una stima più accurata del grado di corrispondenza tra le immagini originali e quelle della nuvola di punti unita.

4.6 Creazione di nuvole 3D geo-morfometriche e radiometriche (X, Y, Z, T)

La nuvola densa IRT che si ottiene alla fine del *workflow* descritto nei precedenti paragrafi è una nuvola geo-morfometrica e radiometrica, cioè ad ogni *pixel* della nuvola è associato un valore radiometrico di temperatura in campo scalare e le rispettive coordinate XYZ, derivanti dall'inserimento dei GPCs della nuvola laser scanner. Tuttavia la nuvola IRT che si ottiene non ha la stessa densità di punti di quella RGB e alcune aree, soprattutto quelle in cui la temperatura è molto omogenea, avranno bassa densità. Questo effetto può essere interpretato come la conseguenza della netta diminuzione dei contrasti di temperatura all'interno dei termogrammi dovuta alla progressiva omogeneizzazione delle temperature superficiali che può influenzare il numero di contrasti e di dettagli geometrici. Queste zone meno dense saranno quelle maggiormente affette da maggiore errore nella fase di allineamento e verifica con la nuvola RGB. Per ovviare a questa problematica e per ottenere un dato ancora più accurato è possibile trasferire le informazioni della temperatura reale delle nuvole di punti IRT alla nuvola di punti RGB di riferimento ad alta risoluzione. Questo compito può essere svolto utilizzando un algoritmo integrato in *CloudCompare* che esegue una ricerca dei punti vicini basata sulla distanza euclidea (NNS) tra le nuvole di punti IRT e quelli della nuvola di punti di riferimento (Guilbert et al. 2020). Questa operazione permette di unire i campi scalari della temperatura delle nuvole di punti IRT alla nuvola di punti ottica ad alta densità e garantire un elevato livello di dettaglio geometrico e di confidenza geospaziale. Per quantificare l'accuratezza dell'*output* finale nella descrizione delle temperature superficiali, è stato eseguito un confronto tra le distribuzioni di temperatura delle nuvole di punti originali e interpolate, per stimare il loro grado di corrispondenza. Seguendo questo flusso di lavoro, che è riassunto in Fig. 4.11, è possibile ottenere una nuvola di punti densa ad alta risoluzione che memorizza gli attributi di temperatura per ogni acquisizione del rilievo digitale.

4.7 Generazione orto-fotopiani termici

L'ultima fase del rilievo termografico consiste nella generazione della *texture* e dei fotopiani orto-rettificati a partire dai *target* del rilievo laser scanner. Gli orto-fotopiani termici hanno una risoluzione ovviamente inferiore rispetto a quella dei fotopiani nel visibile. Per

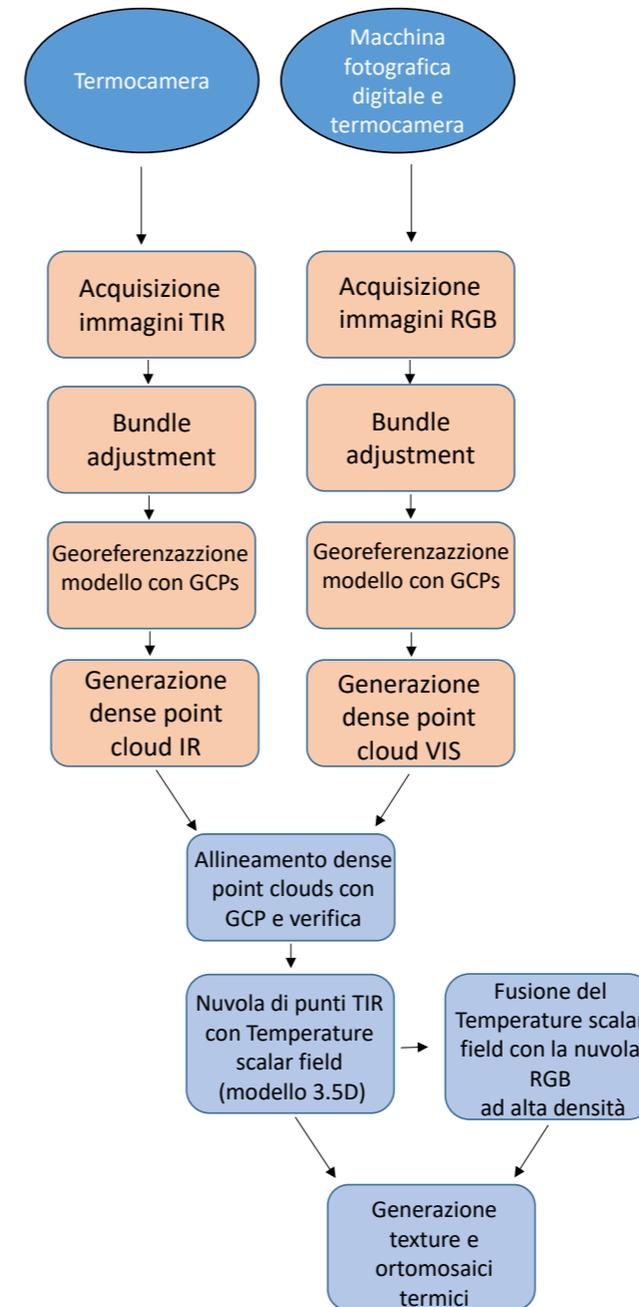


Fig. 4.11 workflow semplificato delle fasi principali utilizzate per la generazione di nuvole di punti 3D-IRT e relativi orto-mosaici.

la loro generazione si possono seguire due soluzioni: Utilizzare come superficie geometrica di riferimento (modello *mesh*) quello derivante dal modello RGB ottico e utilizzare le immagini IRT per il processo di "texturizzazione" del modello 3D, seguendo i criteri già presenti in letteratura (Adamopoulos et al. 2020), in cui quindi l'elaborazione delle immagini IR si limita solamente a stimare l'orientamento delle immagini (Rosina et al. 2017). Generare l'orto-fotopiano dal processo descritto in questo elaborato di tesi, ovvero a partire dalla nuvola di punti IRT.

4.8 Analisi dei risultati

Le immagini IRT e RGB sono state acquisite nel chiostro Verde di Santa Maria Novella per ogni campata, contenente due affreschi. Dopo la realizzazione delle immagini IRT, esse sono state elaborate con il software *IMAGEJ* (plugin *IRImage*) inserendo i valori di U.R., T. ambientale e T. riflessa acquisite *in situ*. Una volta elaborate, le immagini TIF 32 bit sono state inserite nel software *Agisoft Metashape* per la realizzazione dei modelli fotogrammetrici degli affreschi. In questo caso, come affermato precedentemente, prima di realizzare i modelli IRT si è reso necessario elaborare i modelli RGB e geo-referenziarli da coordinate laser scanner tramite l'inserimento di *Ground Control Point* rappresentati, in questo caso, o dai *target* in alluminio o da elementi architettonici ben distinguibili tra i due rilievi multi-sensore. In questa fase verranno mostrati solamente i risultati della quinta campata da sinistra del lato Ovest, a riferimento delle altre undici presenti del chiostro, per le quali è stato adottato lo stesso *workflow* e i cui orto-mosaici finali verranno mostrati nelle schede del Capitolo 5, paragrafo 5.3. In tabella 4.1 sono riportati gli errori quadratici medi nell'inserimento dei GPCs tra nuvole VIS e IR della quinta campata lato Ovest.

Dalla tabella si osserva un errore totale (in cm) quasi raddoppiato per la nuvola IRT in confronto a quella RGB, a causa della bassa risoluzione delle immagini termiche e della difficoltà nell'inserimento manuale dei target. In questa fase, dopo la creazione delle nuvole sparse e l'ottimizzazione delle camere, si può notare una differenza tra le due nuvole dense, in termini di punti, densità e risoluzione (tabella 4.2). Una volta generata la nuvola densa IRT, è stato eseguito un confronto tra le distribuzioni di temperatura delle immagini IRT e della nuvola di punti IRT finale per valutare eventuali errori legati all'operazione di fusione eseguita da

	X errore (cm)	Y errore (cm)	Z errore (cm)	Totale (cm)
Vis point cloud	0.87	0.96	0.77	1.52
IRT point cloud	0.99	0.70	2.60	2.87

Tabella. 4.1 errore quadratico medio (RMSE) dei Grond Control Points tra nuvola Vis e IRT.

Metashape. L'istogramma delle frequenze è stato creato attraverso il software MATLAB®, esaminando un'area di 30 x 30 cm² estratta sia dai termogrammi elaborati sia dalla nuvola di punti IR finale (Fig. 4.12 e 4.13). L'omogeneità di distribuzione della temperatura è abbastanza evidente per i valori estratti sia dai termogrammi che dalla nuvola di

	N. di camere	N. di punti	Densità (punti/cm ²)	Risoluzione (cm/pixel)
Vis point cloud	24	45.640	72.1	0.12
IRT point cloud	22	37.111	3.1	1.80

Tabella. 4.2 confronto tra numero di punti, densità e risoluzione delle nuvole di punti Vis e IRT.

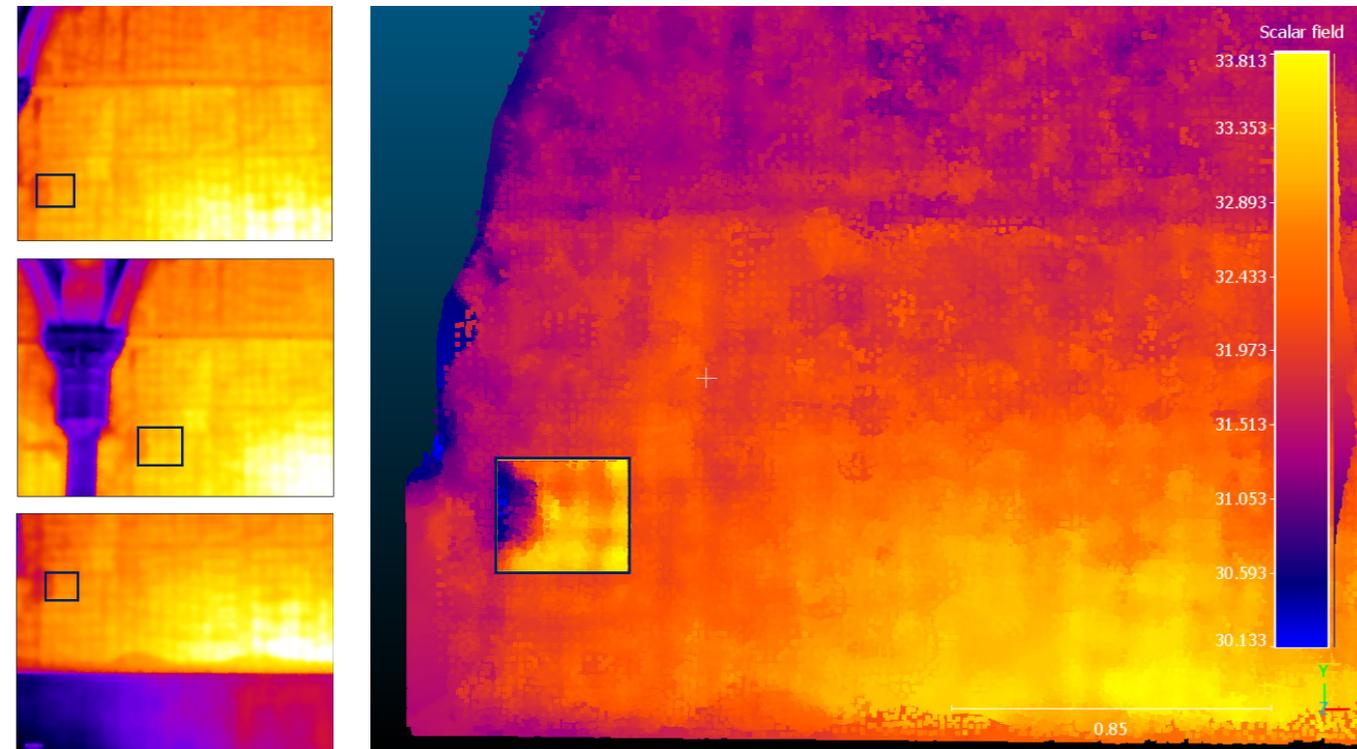


Fig. 4.12 area di 30 x 30 cm² utilizzata per le analisi comparative delle distribuzioni delle frequenze delle temperature tra termogrammi IR 2D (a sinistra) e nuvola IRT-3D (a destra).

punti IRT. Tuttavia tra le distribuzioni di temperatura 2D e 3D si riscontrano lievi differenze ma, poiché sono comprese

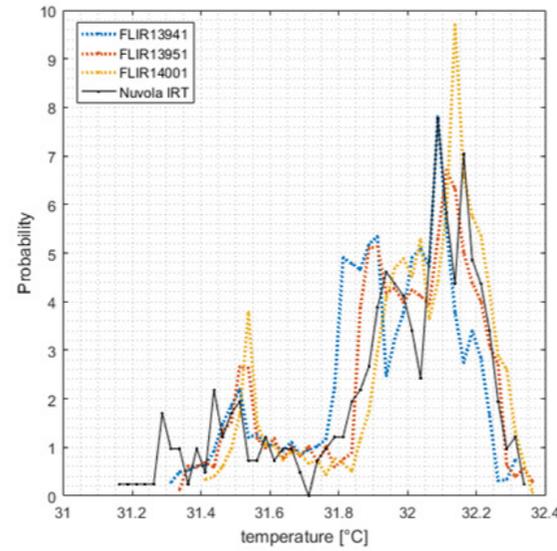


Fig. 4.13 distribuzione delle densità di frequenze in rapporto alla distribuzione delle temperature rilevate dai singoli termogrammi (FLIR 13941,13951,14001) e dalla nuvola IRT risultante.

nell'intervallo di confidenza della sensibilità di misura della termocamera IR (± 2 °C), possono essere considerate trascurabili. Inoltre, l'eterogeneità di probabilità che si riscontra già tra i singoli termogrammi può essere dovuta alla posizione relativa della termocamera e del bersaglio, che può creare discontinuità termiche soprattutto quando l'area analizzata è composta da materiali diversi e forti irregolarità superficiali. L'area analizzata è stata infatti intenzionalmente scelta in una zona dove è presente una perdita di colore, poi integrata a neutro. Per valutare la bontà della generazione e della co-registrazione delle nuvole di punti dense IRT rispetto a quella di riferimento RGB nonché per stimare la loro accuratezza spaziale e geometrica, sono state importate nel software Cloud Compare e sottoposte all'analisi delle distanze residue, eseguita utilizzando lo strumento "Compute

Cloud-/cloud distance" (Fig. 4.14). In particolare, la Fig. 4.14.4 mostra le distanze (in metri) tra la nuvola RGB e quella IRT con una rappresentazione in scala di colori blu-verde-rosso, in cui le distanze negative sono rappresentate in blu, quelle che rimangono invariate in verde e le distanze positive in rosso. Da questa rappresentazione si evince che tra le due nuvole vi è una distanza media di -0,3 cm e una deviazione standard di 0,7, passando da una distanza minima di -2,5 cm ad una massima di circa 2,2 cm. Per compensare l'errore metrico che c'è tra le due nuvole, è possibile ottenere un dato più accurato trasferendo le informazioni relative alla temperatura delle nuvole di punti IRT alla nuvola di punti RGB di riferimento ad alta risoluzione e compensare l'errore metrico che c'è tra le due nuvole, è possibile ottenere un dato più accurato trasferendo la risoluzione basandosi sulla distanza

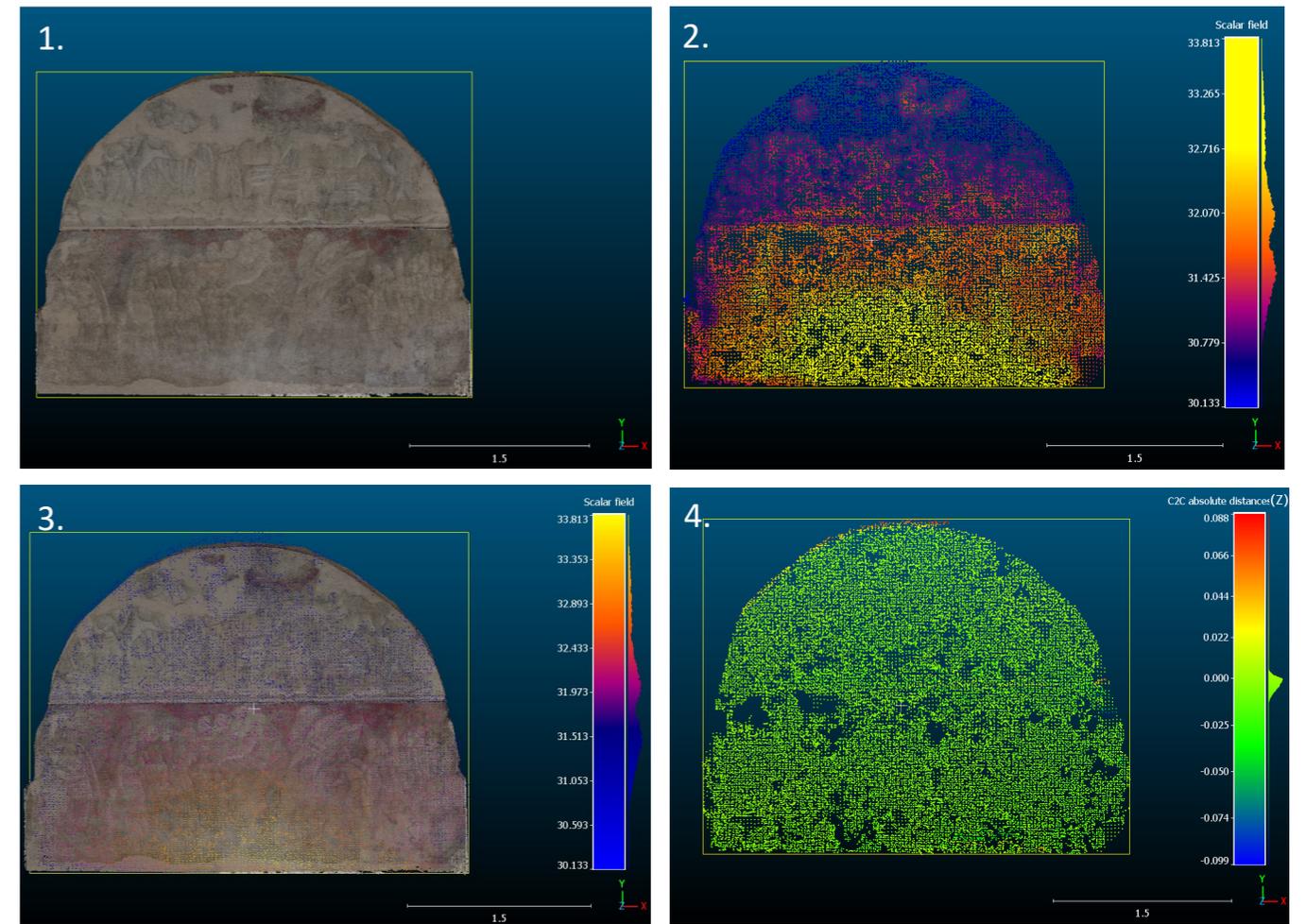


Fig. 4.14 1: nuvola densa Visibile (RGB); 2: nuvola densa IRT, scalar field con valori di temperatura; 3: allineamento nuvole VIS e IRT con GCPs; 4: distanze in metri tra nuvole VIS e IRT, effettuata con lo strumento 'Cloud 2 Cloud distance' di Cloud Compare.

euclidea tra le nuvole di punti IRT e quelli della nuvola di punti di riferimento. Questa operazione permette di unire i campi scalari della temperatura delle nuvole di punti IRT alla nuvola di punti ottica ad alta densità e garantire un elevato livello di dettaglio geometrico e di confidenza geospaziale (Fig 4.15). Anche in questo caso, utilizzando la stessa area di Fig 4.12 è stato eseguito un confronto tra le distribuzioni di temperatura della nuvola di punti originale IRT e di quella interpolata con la nuvola RGB per valutare eventuali errori legati all'operazione di interpolazione. Dall'osservazione della distribuzione delle classi di temperatura delle nuvole di punti, è possibile notare un elevato livello di corrispondenza tra le distribuzioni di frequenza relative alle due nuvole (Fig.4.16), con una differenza media ($\Delta\mu$) pari a $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ e una deviazione standard ($\Delta\sigma$) di $-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$, quindi sostanzialmente trascurabili. I risultati ottenuti dimostrano che l'approccio proposto produce nuvole di punti IRT 3D ad alta affidabilità e accuratezza geometrica, che forniscono informazioni sulle caratteristiche morfologiche e sulle temperature superficiali degli affreschi analizzati.

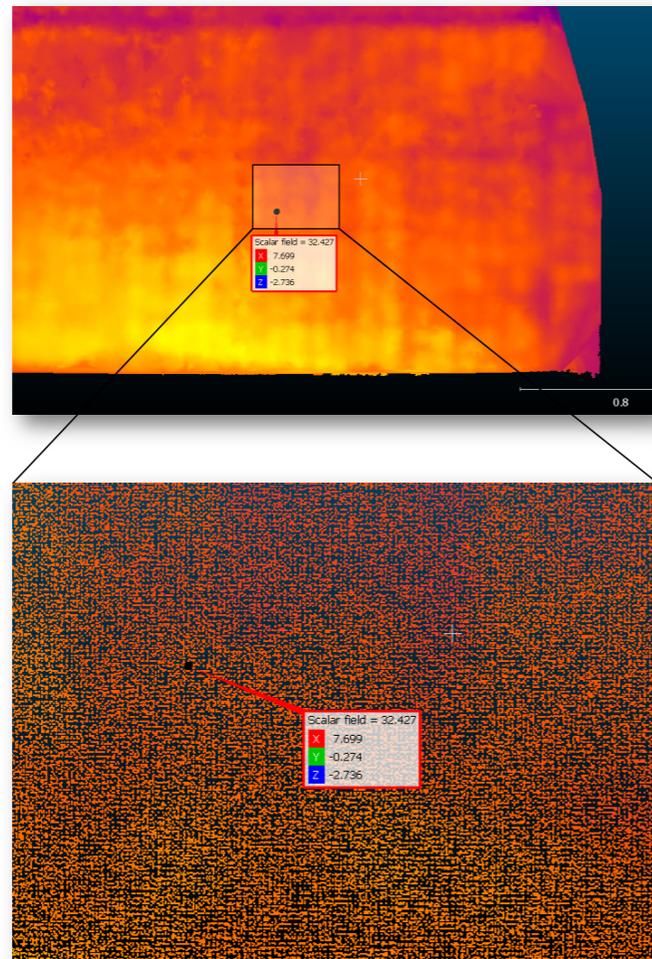


Fig. 4.15 particolare della nuvola IRT 3.5D derivante da interpolazione delle nuvole RGB e IR, con registrate le informazioni radiometriche e morfometriche (X, Y, Z, T).

L'ultima fase del workflow consiste nella creazione della texture e dell'orto-mosaico nel quale sarà possibile localizzare con rigore morfologico e radiometrico tutte le anomalie termiche della superficie. Per la generazione dell'orto-mosaico, come precedentemente illustrato (paragrafo 4.7), si sono seguite due opzioni: la prima parte dalla creazione della mesh ottenuta dalle immagini RGB, in cui le immagini IRT sono state poi importate in un secondo momento e utilizzate per il processo di "texturizzazione" del modello 3D; la seconda opzione prende invece avvio dalla nuvola densa IR ottenuta dal flusso di lavoro descritto nel presente lavoro di tesi. La risoluzione degli orto-mosaici finali è analoga ($4,42\text{ mm/pix}$ per la prima opzione e $4,49\text{ mm/pix}$ per la seconda), si veda Fig. 4.17. Occorre tuttavia sottolineare che nel primo caso non si otterrà ovviamente una nuvola IRT-3D.

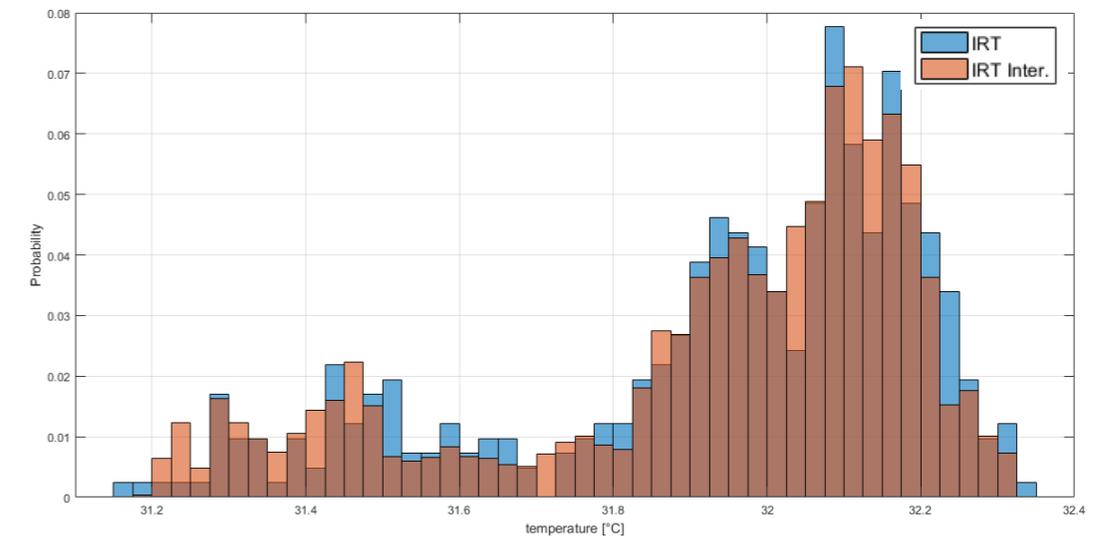


Fig. 4.16 distribuzioni di temperature derivanti da nuvola IRT originale (IRT) e nuvola IRT interpolata (IRT Inter.) con la nuvola RGB.

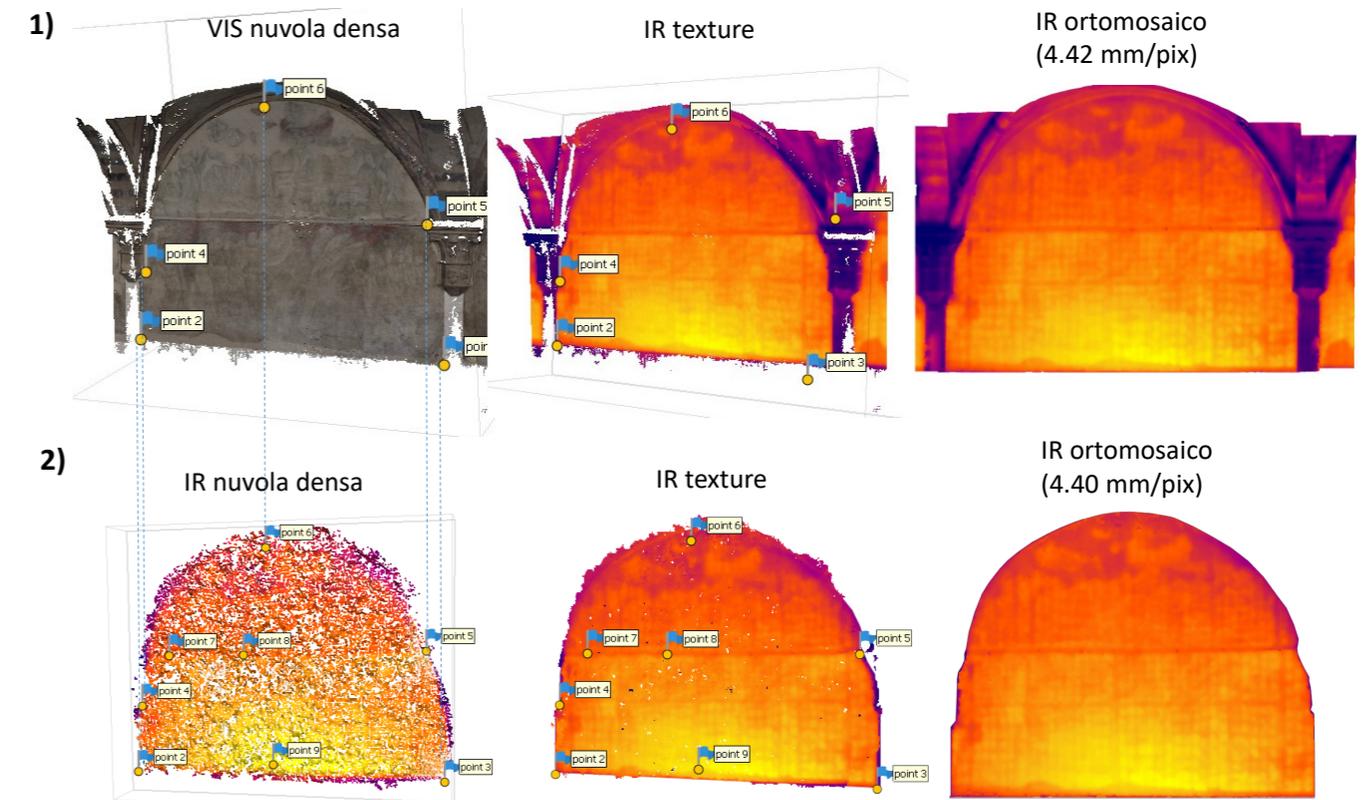
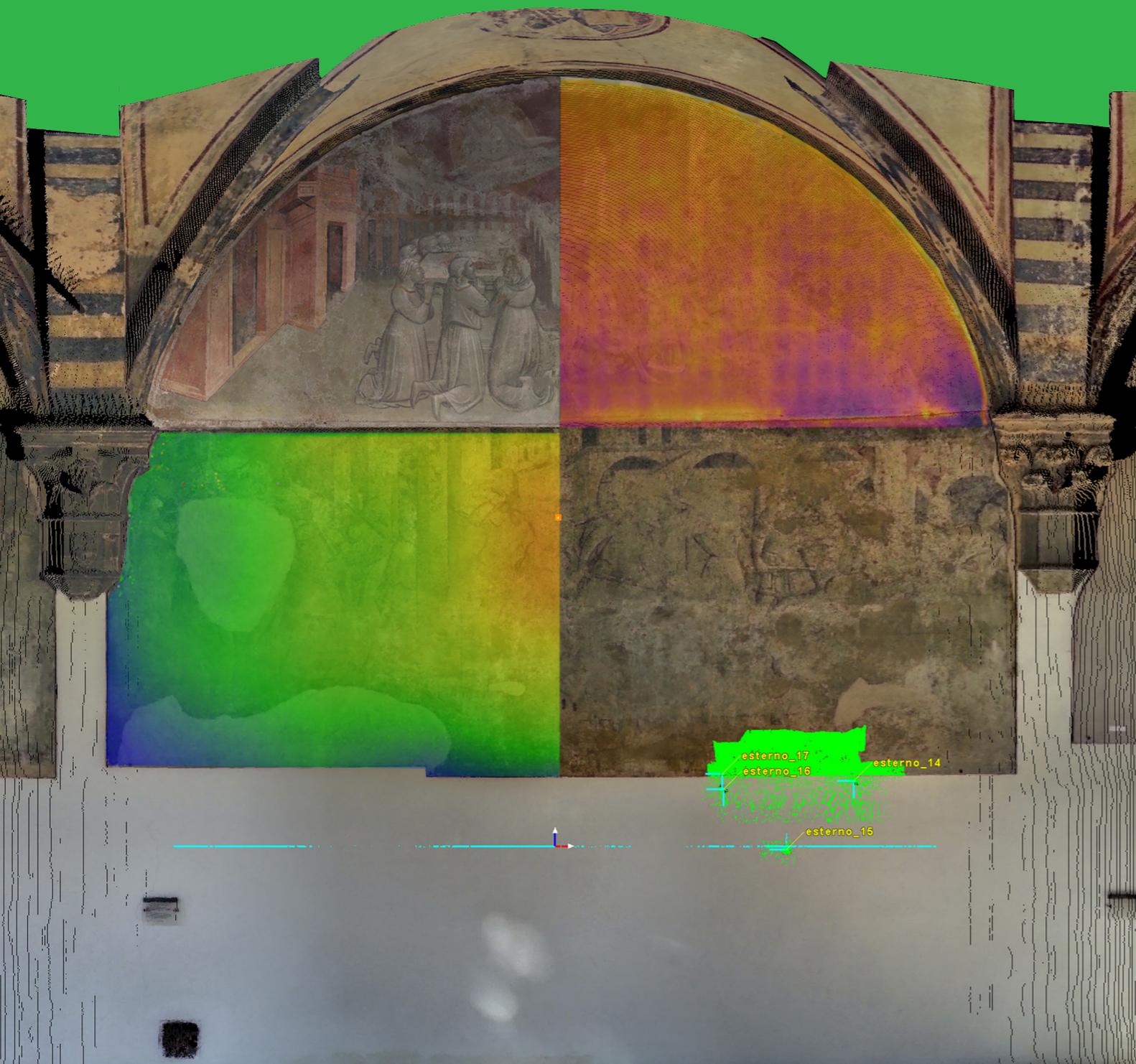


Fig. 4.17 generazione orto-mosaico IR: 1) Uso della superficie geometrica di riferimento (modello mesh) RGB ottico 2) Orto-mosaico a partire da nuvola IRT-3D.



CAPITOLO 5

RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

CAPITOLO 5

RISULTATI DELL'APPLICAZIONE DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

5.1 Allineamento e integrazione dei modelli multi-temporali e multi-scala

L'obiettivo di questa fase era quello di individuare delle linee guida per realizzare dei modelli 3D multi-scala ripetibili, tramite i quali ottenere un rilievo con diversi livelli di dettaglio (dal macro al micro), in cui fosse possibile cioè il passaggio dalla rappresentazione dell'intero sito, a quella dei singoli affreschi fino ai dettagli più minuti (ad es., il quadro fessurativo della superficie pittorica). Durante la fase di acquisizione dati è risultata evidente l'importanza della georeferenziazione, risolvibile tramite l'inserimento di sistemi georeferenziati, considerando tuttavia una differente incertezza delle coordinate in funzione delle possibili risoluzioni del modello di ogni determinato oggetto. Si è trattato quindi di trovare il modo di gestire in modo unitario vari prodotti del rilievo, rispettando la tradizione e i canoni della rappresentazione architettonica. A tal fine, si è investigato il rapporto tra incertezza del modello – derivato dall'incertezza delle misure – e semplificazione del modello, che deriva dalla volontà di selezionare e trasmettere solo alcune informazioni geometriche ritenute essenziali per la descrizione dell'oggetto a una determinata scala. La ricerca è stata organizzata secondo le fasi sotto elencate:

1. Studio delle procedure di rilievo con integrazione laser-scanning e fotogrammetria nel caso dell'intero sito architettonico del complesso in esame. Una particolare attenzione è affidata all'opportunità di realizzare un modello digitale attraverso DEM laser-scanner.
2. Studio dei metodi per l'integrazione dei rilievi in pianta e alzato al fine di definire un unico sistema 3D. Si tratta nella sostanza di individuare delle invarianti rispetto alla scala di rappresentazione nella geometria dell'oggetto e procedere quindi alla georeferenziazione. In questa fase il punto focale è il mantenimento delle caratteristiche metriche dei rilievi alle diverse scale nominali.
3. Ricerca delle procedure ottimali per la realizzazione dei modelli tridimensionali mappati a differenti scale e con differenti livelli di dettaglio sia per la rappresentazione dell'area sia delle architetture.

4. Studio di passaggi di scala dei singoli modelli (sito, architetture, particolari) attraverso semplificazioni basate sulla selezione e attivazione di informazioni geometriche proprie delle diverse scale nominali.

Le scansioni ottenute dal rilievo laser-scanner *TLS* inerente ai diversi tempi di monitoraggio sono state registrate singolarmente fino all'ottenimento di tre diverse nuvole di punti. L'allineamento delle scansioni e la formazione dei *constraint*, una volta ottimizzati, ha portato alla realizzazione di nuvole con errore nullo, anche se è necessario tenere in considerazione l'errore intrinseco strumentale, pari a ± 1 mm per il laser Faro e inferiore a 1 mm per lo Z+F 5016. Le nuvole di punti, tramite il *software Leica Cyclone*, sono state pulite dagli elementi di disturbo (come, ad esempio, i turisti presenti nel chiostro), al fine di renderle utilizzabili ai diversi scopi del presente lavoro. Una volta registrata la prima nuvola (corrispondente dunque al Tempo 0), si è proceduto con la georeferenziazione e individuazione di invarianti multi-scala. Il modello 3D laser-scanner è stato dunque roto-traslato in base ai *target* della rete topografica; la stessa operazione è stata effettuata anche per le nuvole dei Tempi 1 e 2, in modo da allineare i dati e renderli confrontabili tra loro. Attraverso l'uso di alcuni *tools* specifici del *software Cloud Compare*, sono stati individuati i punti nei quali si sono verificati i movimenti tra le diverse superfici e, attraverso le operazioni di calcolo algebrico delle deviazioni nelle tre direzioni, è stato anche possibile quantificare la misura di tali scostamenti. Il livello di dettaglio e l'affidabilità metrica sono stati garantiti inserendo, fra i parametri di calcolo, le tolleranze relative all'errore strumentale del laser scanner e all'errore assoluto, sia in fase di registrazione che in fase di allineamento delle nuvole di punti, relative a ciascun tempo di acquisizione.

Dopo aver allineato e confrontato i modelli utili sia per la rappresentazione dell'area che delle architetture (con scale di rappresentazione rispettivamente 1:100 e 1:50), è stato necessario allineare anche il rilievo laser scanner *close-range*, realizzato con il laser a triangolazione *Hexagon Absolute Arm*. In questo caso, la registrazione delle nuvole è avvenuta tramite il *software 3D Reshaper Meteor* (come riportato nel Capitolo 3, paragrafo 3.4). Le singole nuvole sono state poi importate, in formato .ptx, su *Cyclone*, dove è avvenuta la registrazione

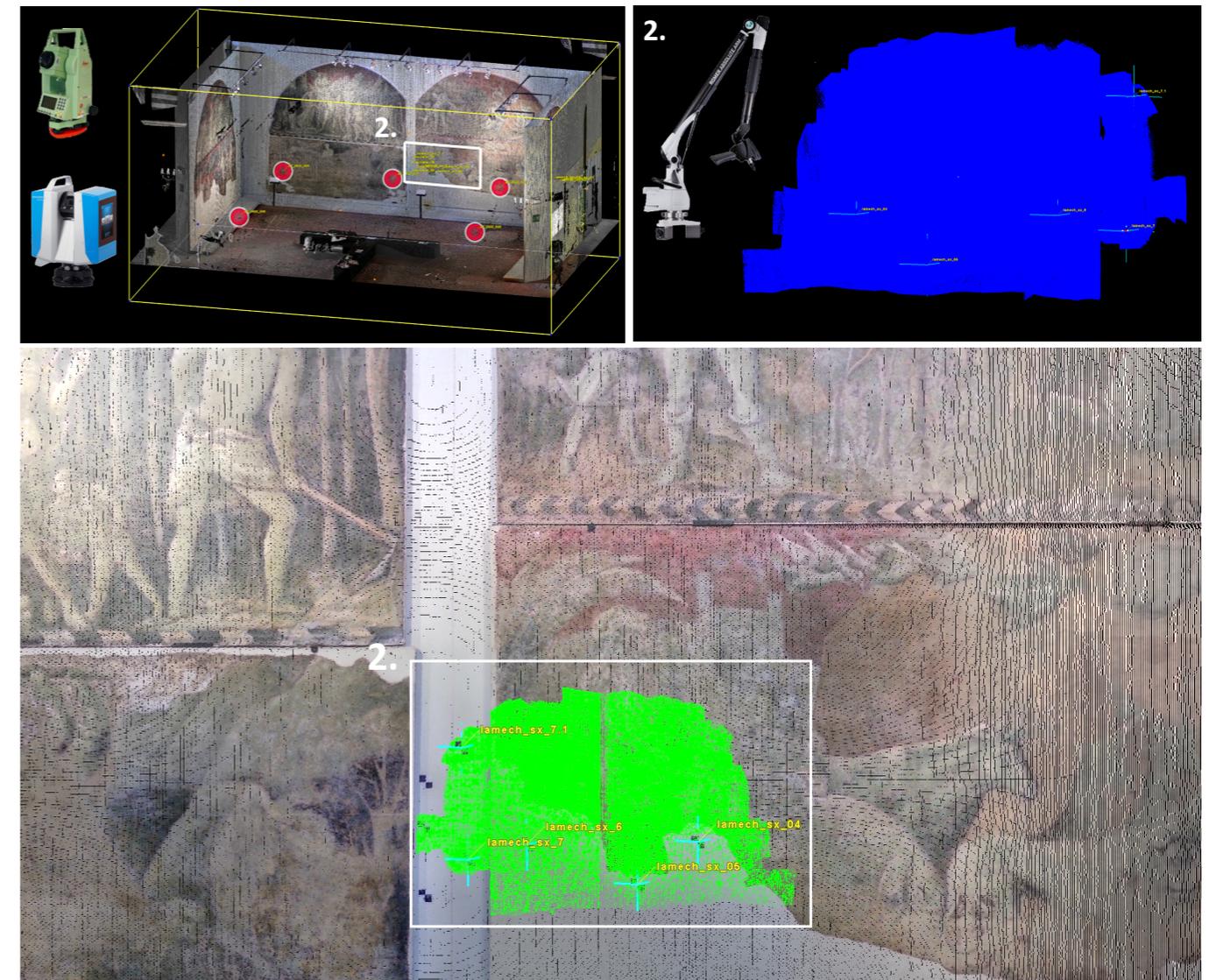


Fig. 5.1 varie fasi di allineamento dell'area 2. In alto a sinistra: allineamento del rilievo laser scanner con target della rete topografica per il monitoraggio delle macro-deformazioni. In alto a destra: successivo allineamento a mezzo target delle nuvole ottenuto dal rilievo di dettaglio. In basso: risultato dell'allineamento multi-risoluzione.

per mezzo dei *target*, nominati in maniera analoga alla nuvola laser-scanner per il riconoscimento automatico dei *marker* (Fig. 5.1). Anche in questa fase è stato essenziale un corretto allineamento delle nuvole per la riduzione dell'errore. Le aree investigate con il laser *close-range ROMER Absolute Arm* per il monitoraggio delle micro-deformazioni sono illustrate in Fig. 5.2 e 5.3. Tali aree risultano essere quelle più critiche, maggiormente soggette a fratture e rigonfiamenti. In particolare, le aree 1, 2, 3 e 4 appartengono a tre affreschi

musealizzati, riportati prima del restauro del 2014 su pannelli di masonite semi-tamburata e, ad oggi, posti su un singolo pannello di masonite con aerolam. L'area 5 corrisponde alla fascia inferiore dell'affresco che occupa la sesta campata del lato Ovest del chiostro Verde, riportato su masonite tamburata. Le aree 1, 2, 3 e 4 (come si vedrà dagli elaborati mostrati nelle schede in allegato del paragrafo successivo) corrispondono esattamente ai punti di giunzione dei singoli pannelli di masonite costituenti il supporto, mentre l'area 5 corrisponde

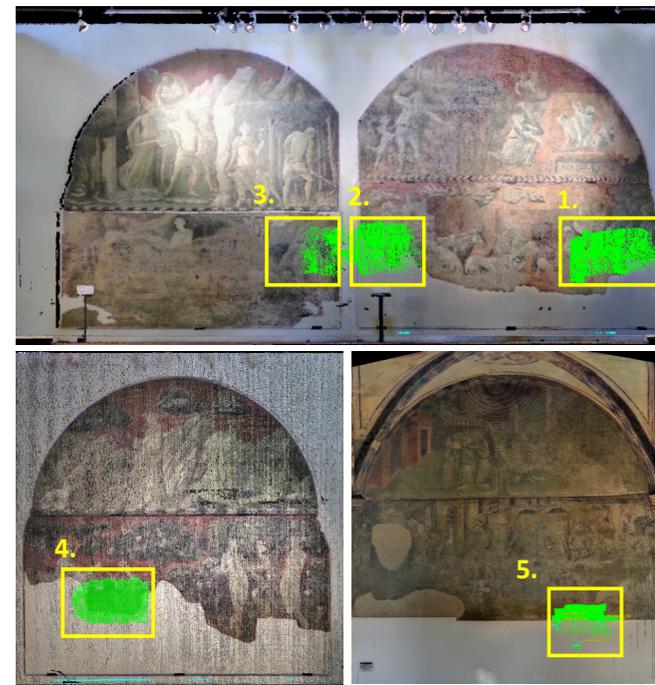


Fig. 5.2 le 5 aree investigate con il laser scanner Romer Absolute Arm. Area 1: Maestro fiorentino "Noè con la famiglia". Area 2: Maestro fiorentino "L'ingresso nell'arca degli animali". Area 3: Maestro fiorentino "Caino uccide Abele". Area 4: Paolo Uccello "La creazione di Eva". Area 5: Maestro fiorentino "I figli di Giacobbe vendicano la sorella".

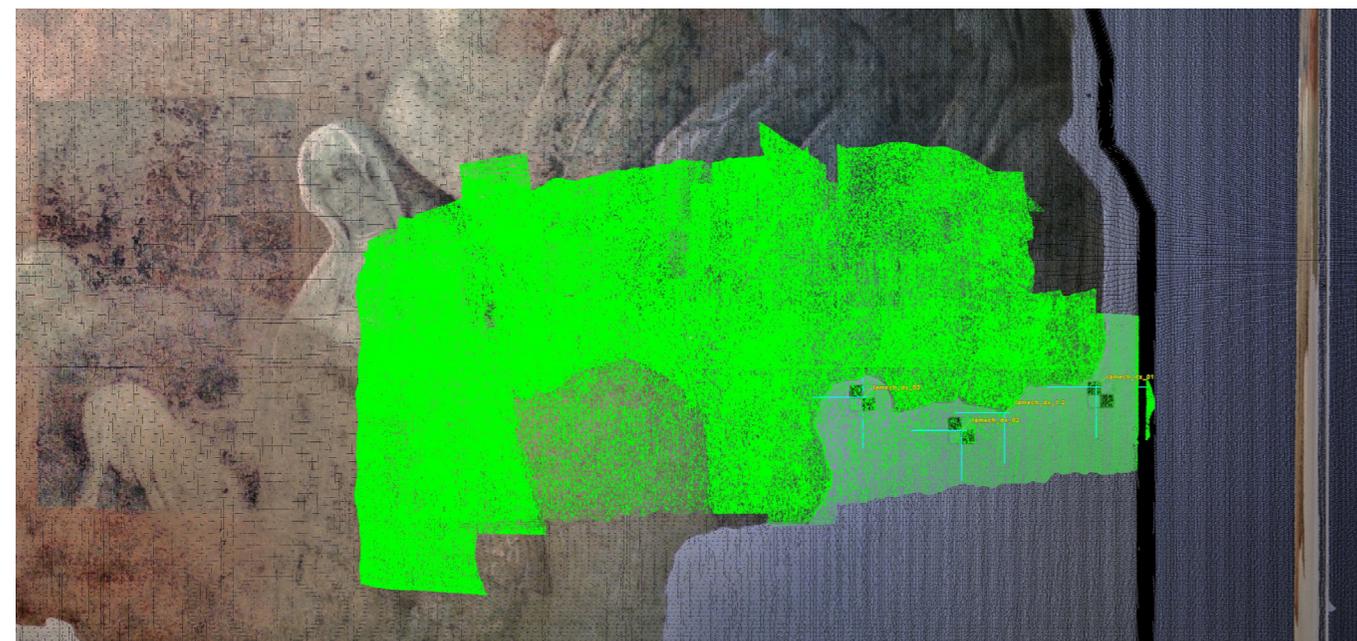


Fig. 5.3 dettaglio area 1 con allineamento a mezzo target delle nuvole laser scanner multi-scala e multi-risoluzione.

ad un punto in cui la vite di ancoraggio alla muratura ha perso di funzionalità.

Come riportato nel capitolo 3, paragrafo 3.8, il laser su braccio meccanico è stato utilizzato nelle aree selezionate, durante due tempi diversi di acquisizione, corrispondenti al Marzo 2022 (T_1) e Ottobre 2022 (T_2).

5.1.1 Specifiche sulla creazione dei modelli digitali di elevazione (DEM), delle sezioni ortogonali ai dipinti murali e degli orto-mosaici

Una volta allineate le nuvole e verificato l'errore, è stato necessario approfondire la creazione di alcuni dei prodotti derivanti dal protocollo metodologico, in particolare la realizzazione dei modelli digitali di elevazione (DEM) per lo studio ed il monitoraggio dei movimenti e delle deformazioni plastiche subite dai supporti e dagli affreschi.

Partendo dalle nuvole del rilievo laser scanner a scala architettonica è possibile impostare UCS (*User Coordinate System*) e piani di riferimento su superfici orizzontali e verticali e rappresentarne le variazioni di quota rispetto ad un piano preferenziale (Drăguț e Eisank 2011). Con queste impostazioni si possono creare i DEM, ovvero rappresentazioni bidimensionali delle superfici tridimensionali che consentono di

apprezzare le variazioni nella direzione normale al piano (De Marco e Parrinello 2021). È dunque possibile valutare la differenza di planarità della superficie: impostato il piano di riferimento (livello 0), vengono misurate le distanze progressive dei punti lungo l'asse Z e ad ogni distanza viene associata una gradazione di colore. Nel caso del chiostro Verde, su *Cyclone* è stata scelta la palette *Multi-Hue/Rainbow* che va dal blu, verde e rosso, nella quale le aree in rosso rappresentano i punti che aggettano maggiormente verso l'osservatore (asse Y), le aree verde sono quelle a quota nulla (appartenenti dunque al piano), mentre le aree blu sono quelle con valori negativi (Brizzi et al. 2022). La scala metrica corrisponde, in questo caso, ad una scala di 9 cm con una risoluzione di 3 mm (sono stati selezionati 30 colori e un delta di 3 mm). In questo modo è stato possibile visualizzare non solo la composizione dei singoli pannelli del supporto, ma soprattutto le deformazioni plastiche delle superfici degli affreschi, individuare i punti critici e monitorarli nel tempo. Per quantificare con maggior precisione l'ordine di grandezza delle variazioni di quota, sui DEM sono state riportate le curve di livello (interdistanza di 3 mm). È stato osservato tuttavia che tale rappresentazione varia considerevolmente a seconda di dove viene impostato il piano di riferimento: come si vede in Fig. 5.4 a., a seconda che il piano sia impostato lungo tutta la muratura del chiostro o solamente lungo una singola campata: la mappa di elevazione infatti varia notevolmente poiché la muratura non è in asse per tutta la lunghezza del lato del chiostro. Per questo motivo è fondamentale considerare ogni singola campata come elemento a sé, escludendo anche tutti gli elementi architettonici (quali peducci, cornici, piano di imposta dei costoloni), che possono compromettere la corretta lettura del modello di elevazione (Fig. 5.4 b e 5.4 c).

La visualizzazione dei DEM nelle due sezioni del chiostro rappresentati in Fig. 5.4 c. non è errata, ma per poter quantificare con maggiore accuratezza l'ordine di grandezza delle deformazioni occorre scendere ad una scala di dettaglio maggiore, considerando ogni singolo affresco come un sistema isolato dal contesto in cui è inserito e impostando il piano di riferimento, da cui far partire l'elevation map, nella muratura sottostante ciascun affresco, essendo essi incassati e in asse con la parete. In questa fase è stato dunque scelto di lavorare con *Cloud Compare*, in cui, una volta caricata la porzione di nuvola d'interesse in formato .pts con il corretto sistema di coordinate, occorre creare un DEM partendo da un elemento verticale, ovvero la muratura. Questo approccio è molto utile nel caso delle murature e delle facciate per capire se ci

sono deformazioni, fuori piombo e danneggiamenti vari (Hamid-Lakzaeian 2020). Il DEM ha in questo caso un piano di proiezione lungo l'asse Y e non lungo l'asse Z, come solitamente avviene. Nel sistema locale di *Cloud Compare* si vedrà dunque la muratura con l'affresco parallela all'asse XZ, così come da impostazione dei piani eseguita su *Cyclone*.

Per verificare se effettivamente la muratura appartiene al piano XZ, con *Cloud Compare* viene creato un piano parallelo al piano XZ da utilizzare come riferimento per verificare se la nuvola è perfettamente parallela a tale piano. Se il piano creato giace su quello XZ, e se (come mostrato in Fig. 5.5 a.), la nuvola giace perfettamente su tale piano (tranne ovviamente per le zone deformate), allora non è necessaria nessuna operazione di rotazione. A questo punto dunque si può effettuare la rasterizzazione per la creazione del DEM, impostando come dimensione del singolo pixel 3 mm, ovvero lo stesso ordine di accuratezza del laser scanner Faro M70 (2/3 mm). Il raster generato mostra la proiezione di tutti gli elementi della nuvola di punti sul piano XZ, che fitta e approssima nel miglior modo possibile il piano di giacitura di tutti i punti della muratura. Ci sono diverse colorazioni, in questo caso la palette utilizzata su *Cloud Compare* è quella *Blue>Green>Yellow>Red*, in cui le variazioni maggiori rispetto al piano di riferimento sono codificate in rosso e in blu, rispettivamente per distanze positive e negative (Fig. 5.5 b.). L'immagine raster creata può essere esportata in diversi formati, tra questi c'è anche il formato geoTIFF, che può essere letto in QGIS dove è possibile trattare il dato per fare ulteriori analisi, confronti, valutazioni della tessitura muraria ecc.

Un'altra opzione che permette di visualizzare nel dettaglio le distanze dei punti della nuvola dal piano XZ è la possibilità di trasformare tale piano in una nuvola di punti con lo strumento "sample point on a mesh" e calcolare la distanza tra le due nuvole con lo strumento "compute cloud/cloud distance (C2C)" e evidenziare solamente le distanze (in m) lungo l'asse Y (si veda Fig. 5.5 c.)

Un ulteriore nuovo plugin offerto da *Cloud Compare* è quello "MPlane" che permette di generare un piano sulla base di almeno tre punti scelti su una superficie. Il plugin consente di calcolare la distanza dei punti della nuvola dal piano creato e attribuire a ciascuno di questi punti un'informazione di campo scalare («www.3dmetrica.it») La guida per la scelta dei tre punti è l'immagine DEM raster creata precedentemente, in particolare le aree verde, quelle ovvero a quota zero. Quello che si ottiene non è una differenza di quota lungo l'asse y,

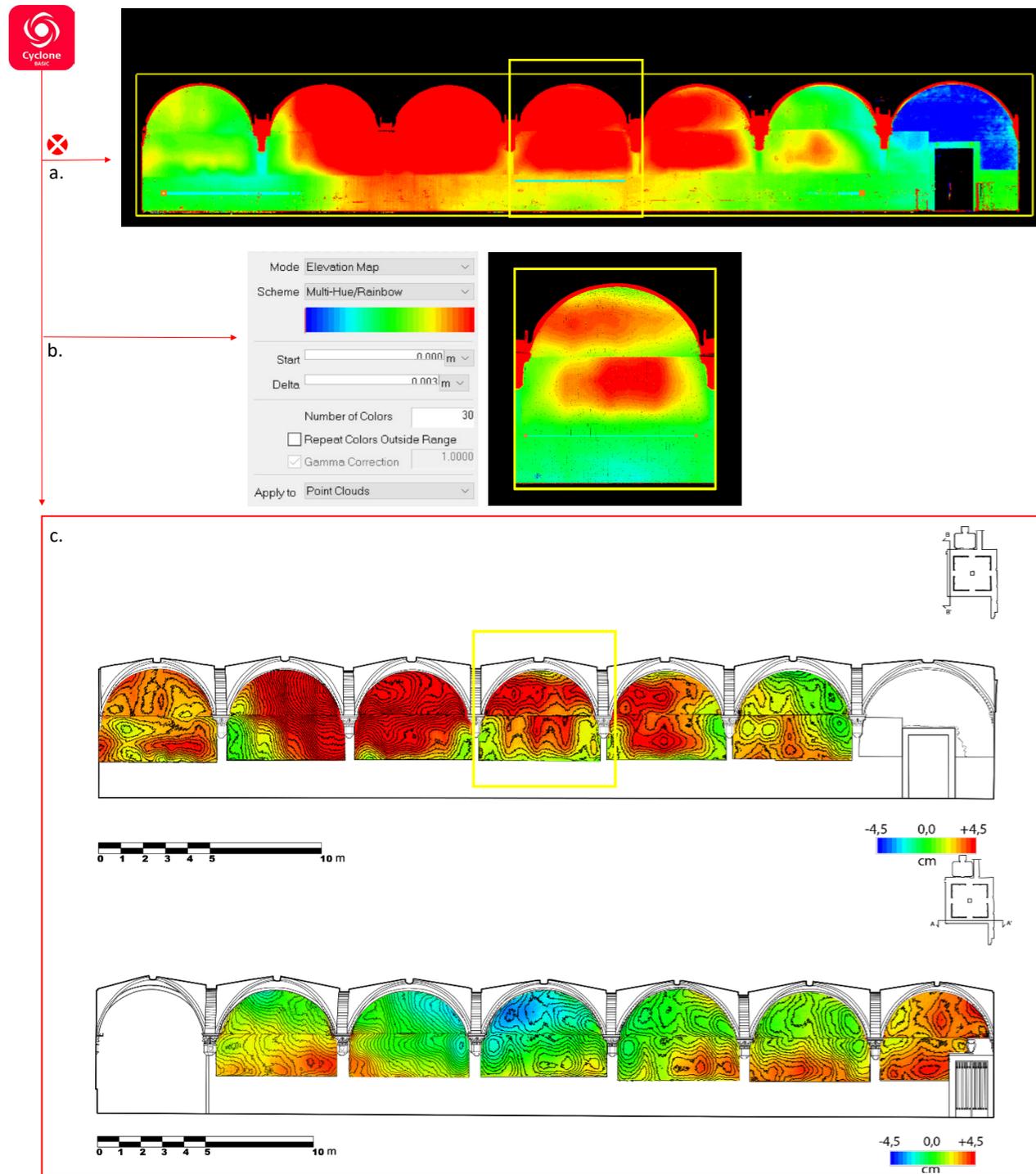


Fig. 5.4 a. creazione dei DEM con UCS impostato lungo l'intera muratura del lato Sud e Ovest del chiostro Verde; b. creazione dei DEM con UCS impostato su ogni singola campata; c. rappresentazione dei DEM con sovrapposte le curve di livello realizzate per ogni campata del lato Ovest e Sud del chiostro Verde.

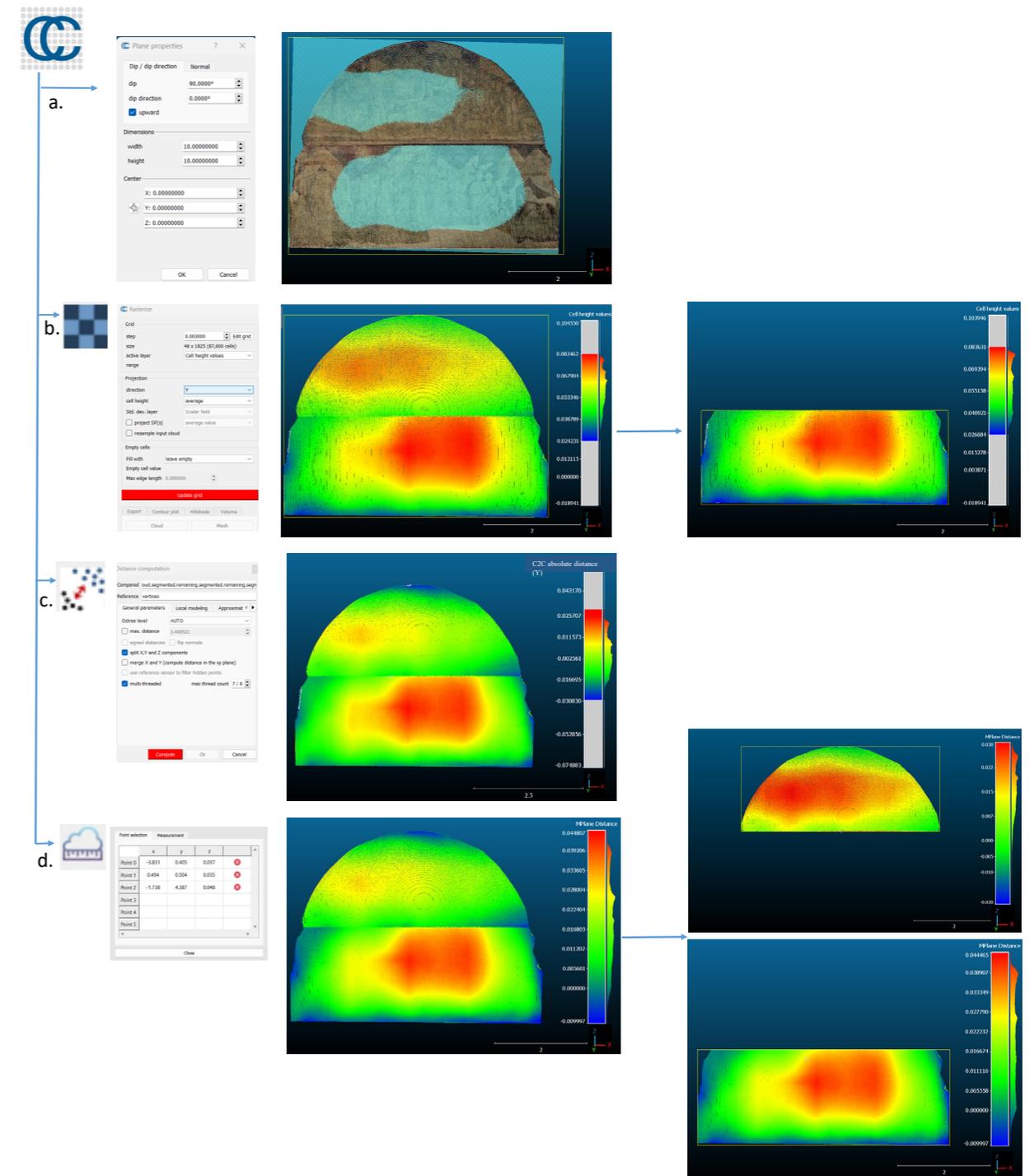


Fig. 5.5 differenti metodi di rappresentazione dei DEM su Cloud Compare. a. creazione piano parallelo al piano XZ da utilizzare come riferimento per verificare se la nuvola è perfettamente parallela a tale piano; b. rasterizzazione della nuvola per la generazione del DEM; c. calcolo di differenze in m tra la nuvola e il piano XZ (plugin C2C); d. plugin MPLANE per il calcolo dei punti della nuvola dal piano creato a partire da tre punti selezionati sulle aree a quota zero.

ma è una distanza dal piano, quindi ciascun punto viene proiettato sul piano in maniera perpendicolare. La colorazione della nuvola (blu-rosso) indica la distanza (in m) dei punti dal piano (Fig 5.5 d.).

I risultati ottenuti con i vari strumenti offerti da *Cloud Compare* sono omogenei tra di loro per quanto riguarda la colorazione relativa sia all'intera campata sia ai due registri considerati singolarmente, tuttavia ciò che non è concorde è la scala relativa alle distanze (per il DEM raster le aree in rosso arrivano fino a 8 cm, con deviazione standard di 0.012 m con il C2C tra nuvola e piano parallelo si arriva a 3 cm con deviazione standard di 0.011 m, mentre con il plugin *MPlane* vengono raggiunti 4.5 cm con una deviazione di 0.011 m). Per capire quale strumento di generazione dei DEM riesce ad avvicinarsi maggiormente alla realtà sono state esportate le sezioni ortogonali alla muratura (una centrale per ogni campata, con origine sul centro della chiave di volta- Fig 5.6 e 5.7) e ne sono state misurate le distanze in *Autodesk Autocad*.

Come sarà illustrato successivamente nelle schede di catalogazione, la distanza tra le sezioni e la muratura è stata calco-

lata dal piano che unisce la muratura sottostante gli affreschi con la parte sommitale, fino al punto di maggiore deformazione rilevata sulla superficie dell'affresco mediante il rilievo laser scanner. Per valutare le deformazioni (in cm) dei pannelli lungo l'asse Y, è stato deciso di scalare le sezioni lungo l'asse orizzontale di un fattore 10, in modo da apprezzarne con maggiore facilità le variazioni rispetto all'altezza della muratura (in m) (Costanzo et al. 2014). Secondo la valutazione di tali distanze, il metodo di creazione dei DEM per la quantificazione delle deformazioni maggiormente concorde con la realtà, è risultato essere quello realizzato con lo strumento *MPlane*. Occorre tuttavia fare attenzione al fatto che più punti si prendono sulla superficie, più rischio c'è di interpolare zone che in realtà non appartengono allo stesso piano, quindi il DEM raster creato in prima fase serve comunque per guidare in maniera meticolosa la scelta di punti per la costruzione del piano di riferimento *MPlane*.

Contemporaneamente all'elaborazione dei dati ottenuti dal rilievo laser-scanner, sono stati elaborati i dati fotogrammetrici. Per ottenere buoni risultati è opportuno che le fotografie utilizzate per la fotogrammetria con tecnica SfM non presentino

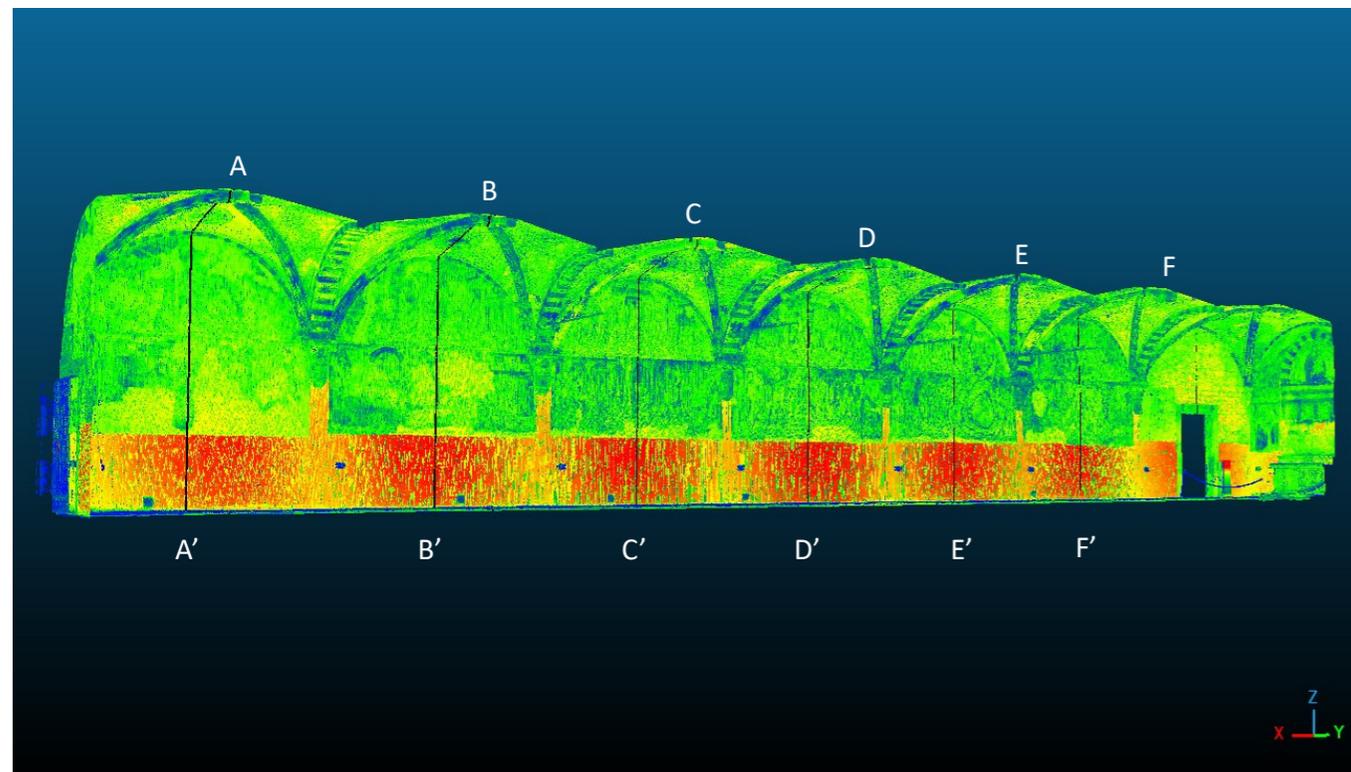


Fig. 5.6 sezioni laser scanner lato Ovest, chiostro Verde.

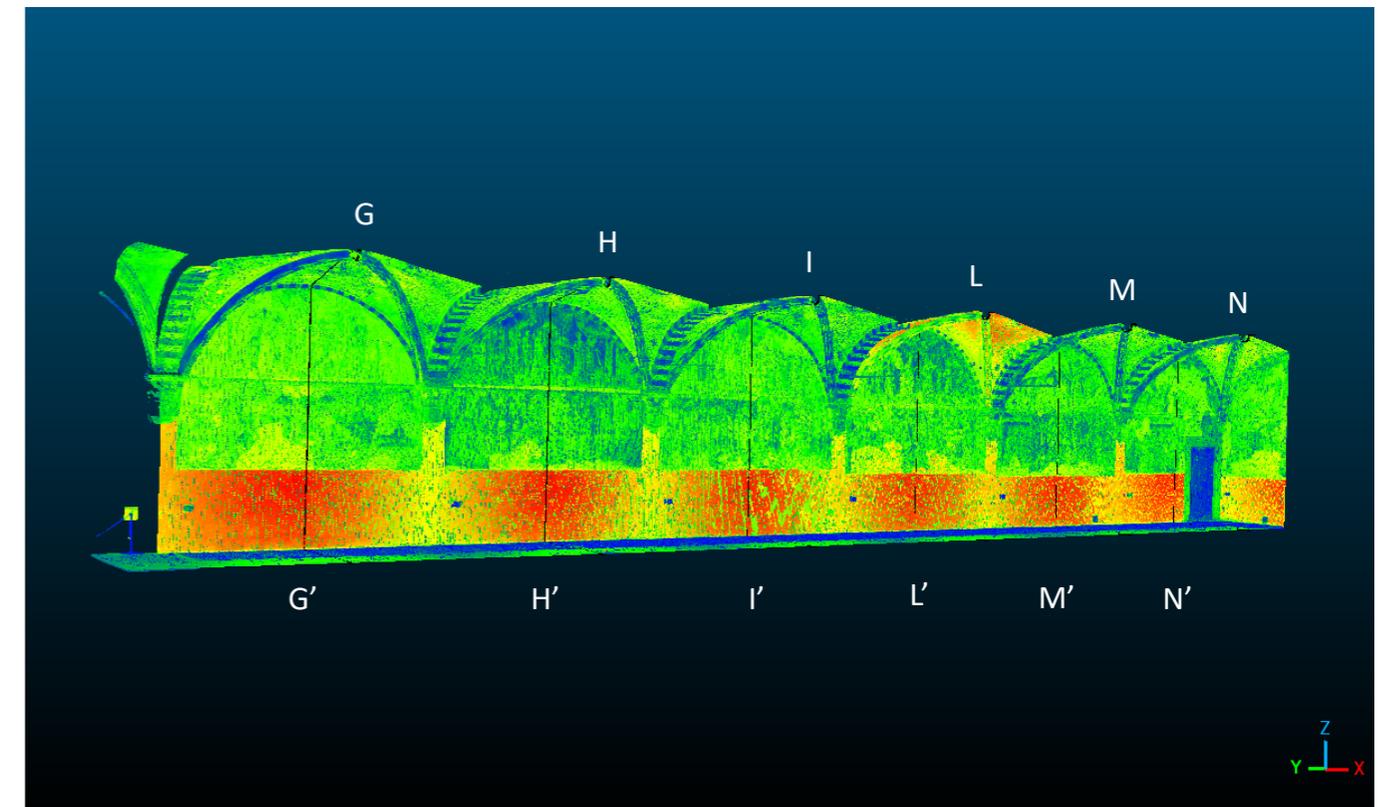


Fig. 5.7 sezioni laser scanner lato Sud, chiostro Verde.

ombre troppo nette ed abbiano un'esposizione tale da consentire di utilizzare parametri adeguati per lo scatto (ISO bassi, rapporto focale basso, tempo di esposizione breve). Poiché le campagne fotografiche sono state acquisite sia in interno che in esterno, le fotografie state catalogate in base all'ambiente in cui sono state acquisite e i singoli fotogrammi in formato RAW sono stati calibrati generando il profilo colore specifico tramite il *color-checker*. Per il rilievo in esterno è stato scelto di acquisire le immagini solo con luce naturale, privilegiando le ore della giornata con condizioni di illuminazione più favorevoli, mentre per le foto acquisite in interno ci si è avvalsi di illuminanti artificiali (come riportato nel Capitolo 3, paragrafo 3.3). Le foto acquisite da terra sono servite anche a documentare alcuni dettagli significativi degli affreschi che difficilmente sarebbero stati acquisiti tramite rilievo laser-scanner o fotogrammetrico. Le immagini, una volta elaborate e dopo avere creare il profilo colore corretto tramite il *color-checker*, sono state importate nel software *Agisoft Metashape* per la costruzione di modelli 3D di alta qualità. I singoli *set* sono stati elaborati separatamente all'interno dello stesso file:

il *software* riconosce le posizioni di scatto delle fotografie, stima le coordinate spaziali di punti omologhi a partire dai parametri interni della fotocamera e allinea le immagini ricostruendo la geometria dell'acquisizione. Dalla nuvola di punti creata si ottengono dei modelli tridimensionali di *mesh* *texturizzati*.

In questo caso i modelli di *mesh* sono stati referenziati sulla base della nuvola di punti da laser scanner, in modo da avere la stessa scala e lo stesso orientamento nello spazio. In particolare sono stati identificati tre punti ben riconoscibili sul modello *mesh* di ogni affresco, ai quali sono stati assegnati dei "markers", le cui coordinate sono state modificate in modo da essere uguali a quelle dei tre punti omologhi appartenenti alla nuvola di punti da laser-scanner. I modelli di *mesh* sono stati poi combinati in un unico modello complessivo. Dai modelli *mesh* è possibile ottenere gli orto-mosaici dell'oggetto architettonico, ovvero delle immagini orto-rettificate per ogni affresco, mostrate nelle schede di catalogazione.

5.2 Risultati del rilievo close-range con laser di precisione ROMER Absolute Arm

Dopo aver allineato complessivamente tutte le nuvole di punti acquisite con il laser di precisione per mezzo dei *target* piani, ogni nuvola è stata poi trattata singolarmente, isolandola dalla nuvola TLS e analizzandola su un singolo *layer*. Questo trattamento si è reso necessario per evitare di introdurre possibili errori dovuti alle diverse risoluzioni e accuratezze delle nuvole (Wilson et al. 2012). Le nuvole *close-range* sono state dunque esportate da *Cyclone* ed elaborate su *Cloud Compare*, dove le coppie di nuvole allineate, corrispondenti ai tempi T1 e T2, sono state sottoposte all'esportazione delle aree e delle *slices* utili per la creazione di grafici 2D con il profilo della superficie d'interesse. Prima di procedere con tale elaborazione è stato effettuato un controllo sulla densità delle coppie di nuvole in modo da renderle confrontabili (con lo stesso ordine di grandezza), tenendo anche in considerazione che ogni scansione *close-range* è stata eseguita manualmente dall'operatore, seguendo il profilo della superficie del dipinto, senza limitazioni di orientamento angolare specifico. Dalle nuvole così ottenute, aventi una media di circa 17.000.000 punti, sono stati esportati i profili multipli (*slices*) della nuvo-

la ad intervalli ripetuti di 10 cm, per mezzo dello strumento "cross section" di *Cloud Compare*. Le coordinate XYZ di questi profili sono stati salvati come file di testo e importati all'interno del software *MATLAB*® che, grazie a delle funzioni *built-in*, ha permesso di rappresentare graficamente il risultato come mostrato nelle Fig. 5.8-5.12. Per ognuna delle 5 aree investigate con il laser *close-range* vengono riportati solamente due grafici, quelli maggiormente rappresentativi delle tendenze dei movimenti millimetrici e sub-millimetrici.

Dai risultati ottenuti per le aree 1 e 2, riferite all'affresco muséalizzato "Noè con la famiglia e l'ingresso nell'arca degli animali", si nota la presenza costante tra tempo T1 e T2 di una frattura, con un'apertura massima di circa 0.9 mm (Fig. 5.8 e 5.9). Per l'area 3 dell'affresco "Caino uccide Abele", si rileva un rigonfiamento della pellicola pittorica al tempo T2, segno di rischio per la formazione di una possibile frattura e perdita di colore (si veda Fig. 5.10). Per la fascia inferiore dell'affresco "I figli di Giacobbe vendicano la sorella" situato nel lato Ovest del chiostro, si rileva una deformazione di 2,1 mm in soli 12 cm di porzione di affresco (Fig 5.12). Tale deformazione risulta in corrispondenza di due viti ancorate alla muratura che non svolgono più correttamente la loro funzione di tenuta.

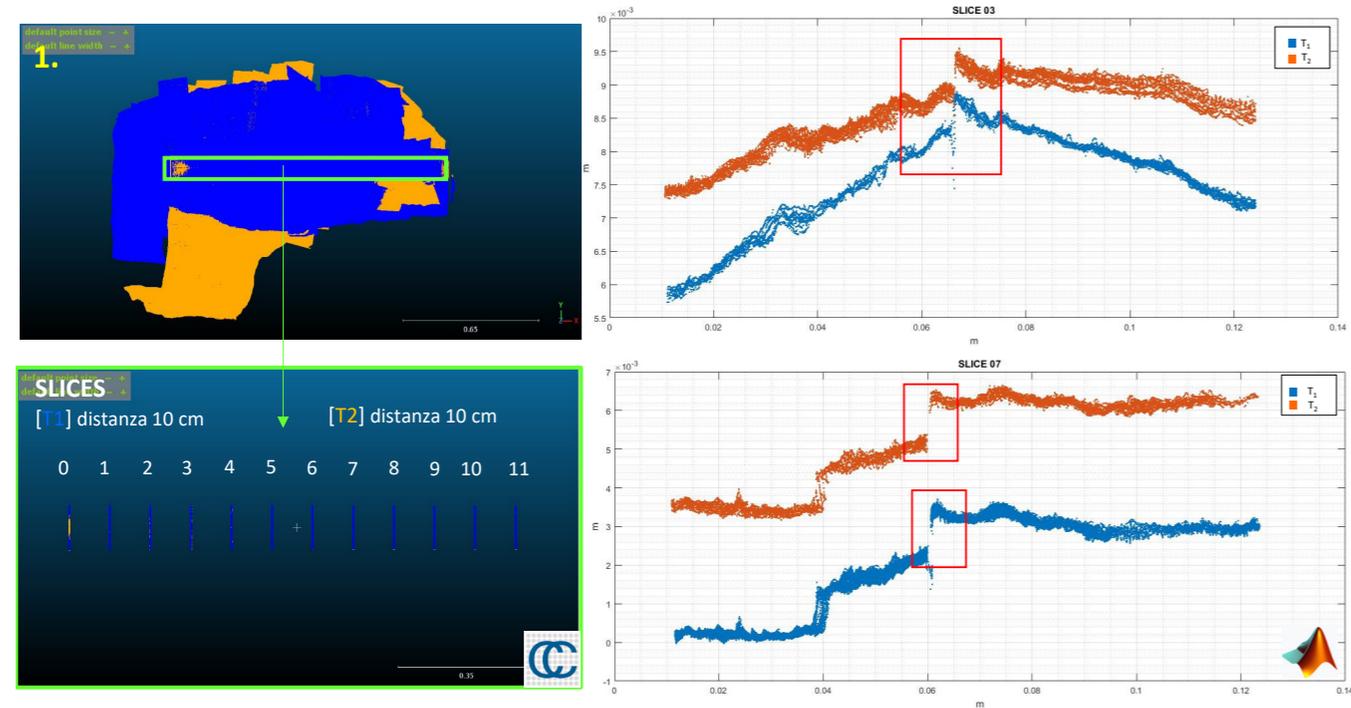


Fig. 5.8 a sinistra: nuvole al tempo T1 (blu) e T2 (arancione) ottenute sull'area 1 (Maestro fiorentino "Noè con la famiglia") ed esportazione delle slices su *Cloud Compare*. A destra: due profili 2D della lesione della pellicola pittorica, ottenuti tramite il software *Matlab*.

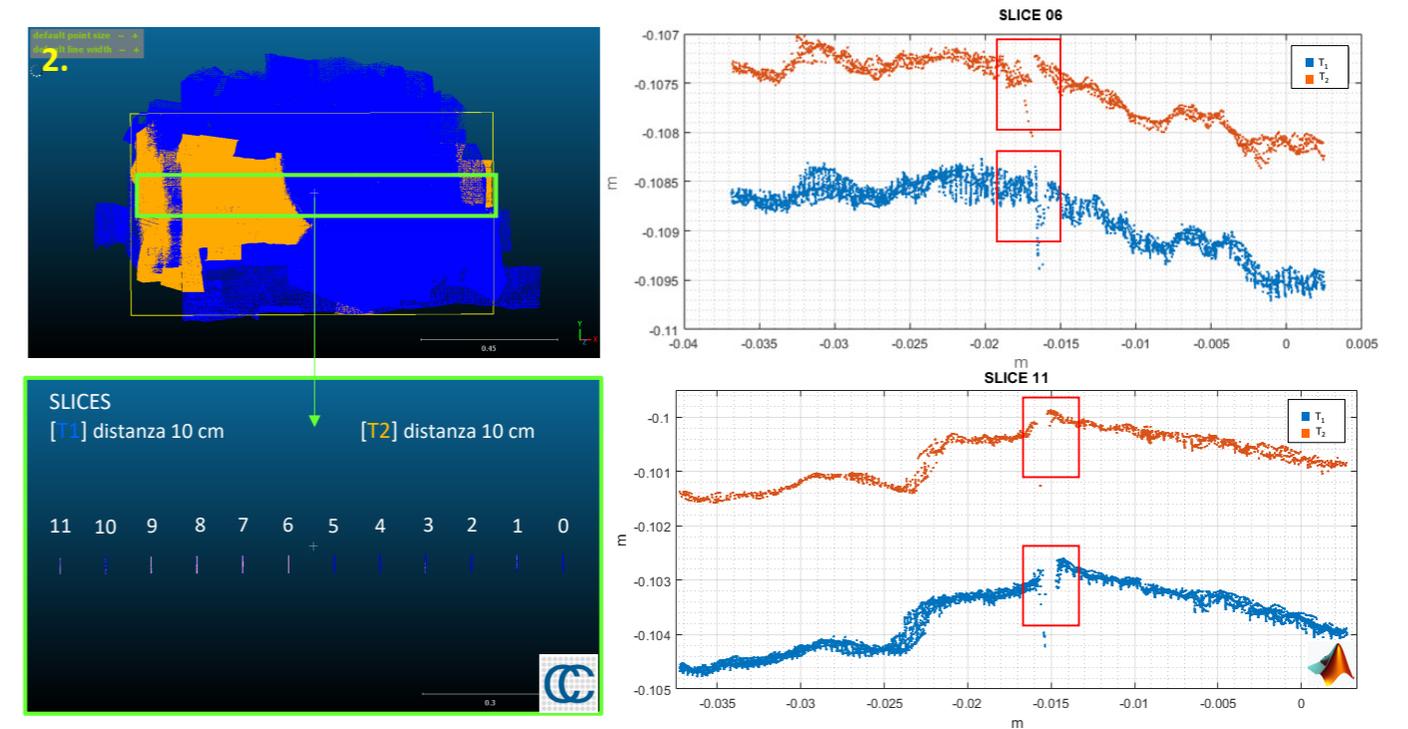


Fig. 5.9 a sinistra: nuvole al tempo T1 (blu) e T2 (arancione) ottenute sull'area 2 (Maestro fiorentino "L'ingresso nell'arca degli animali") ed esportazione delle slices su *Cloud Compare*. A destra: due profili 2D della lesione della pellicola pittorica, ottenuti tramite il software *Matlab*.

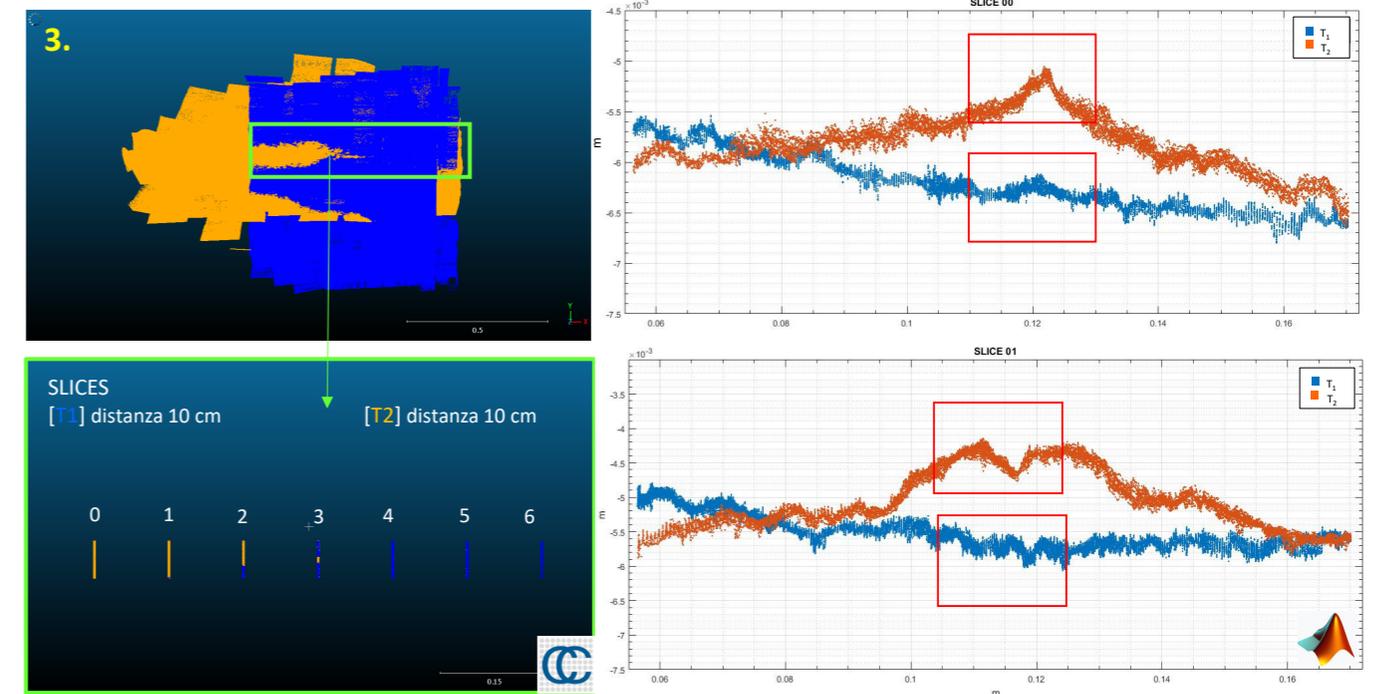


Fig. 5.10 a sinistra: nuvole al tempo T1 (blu) e T2 (arancione) ottenute sull'area 3 (Maestro fiorentino "Caino uccide Abele") ed esportazione delle slices su *Cloud Compare*. A destra: due profili 2D della zona a rischio cretto della pellicola pittorica, ottenuti tramite il software *Matlab*.

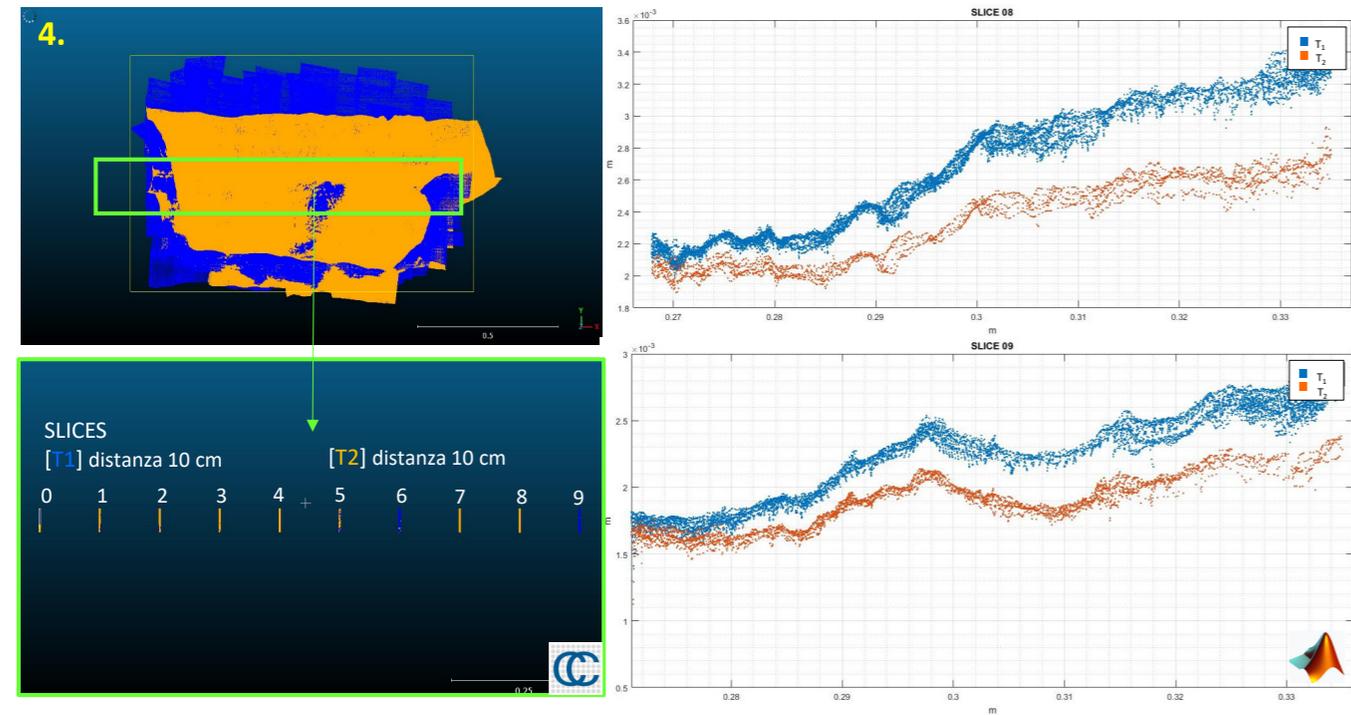


Fig. 5.11 a sinistra: nuvole al tempo T1 (blu) e T2 (arancione) ottenute sull'area 4 (Paolo Uccello "La creazione di Eva") ed esportazione delle slices su Cloud Compare. A destra: due profili 2D della zona a rischio crollo della pellicola pittorica, ottenuti tramite il software Matlab.

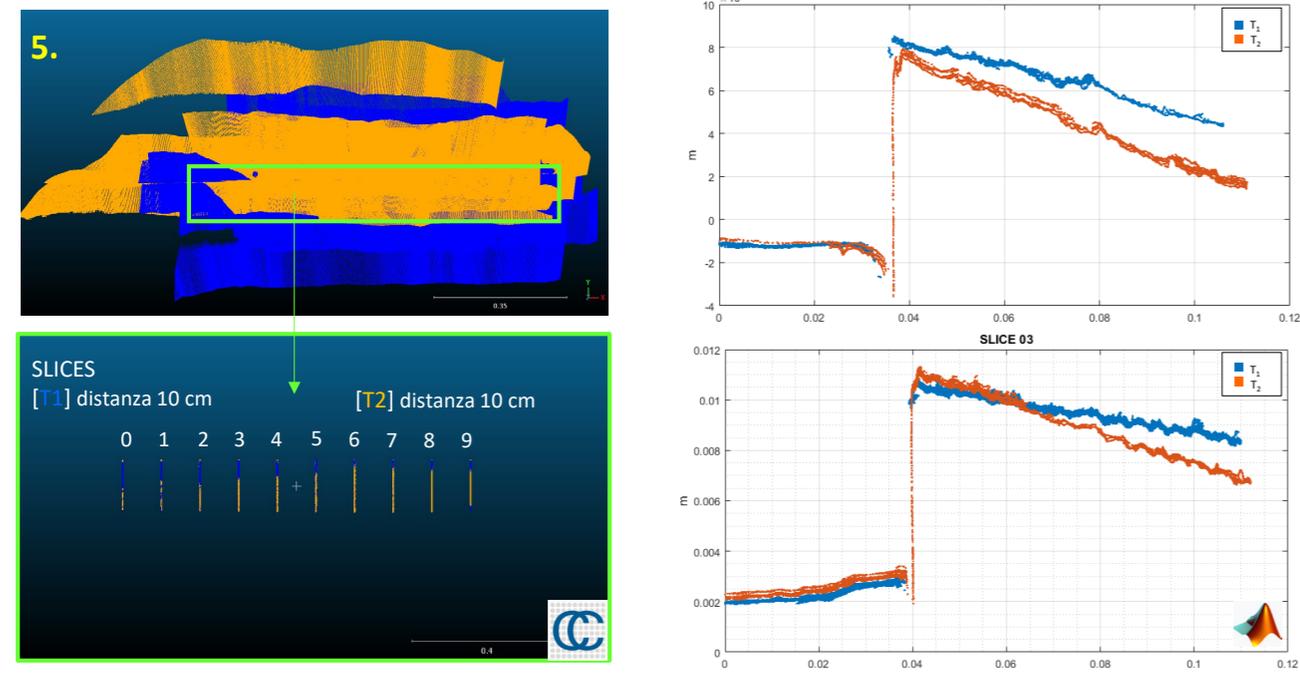


Fig. 5.12 a sinistra: nuvole al tempo T1 (blu) e T2 (arancione) ottenute sull'area 5 (Maestro fiorentino "I figli di Giacobbe vendicano la sorella") ed esportazione delle slices su Cloud Compare. A destra: due profili 2D della zona deformata tra due viti di ancoraggio, ottenuti tramite il software Matlab.

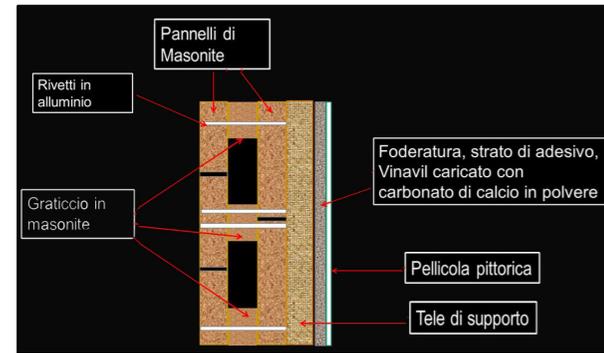
5.3 Schedatura per il censimento degli affreschi del chiostro Verde nella basilica di Santa Maria Novella

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA		UNIVERSITÀ DEGLI STUDI FIRENZE
A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023		
Nome registro superiore Dio ordina ad Abramo di partire da Carran per andare nella terra di Canaan Nome registro inferiore Dio appare ad Abramo nella valle di Sichem; Abramo vi edifica un altare, quindi pianta una tenda tra Ai e Betel Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-Reg. superiore 0900281148-2 Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-Reg. inferiore 0900281148-3 Autore Ignoto pittore fiorentino Anno 1425-1449 Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato		
LOCALIZZAZIONE Nazione Italia Regione NUTS2 Toscana Città Firenze Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella Area Chiostro Verde, lato Sud, 1° campata		
REGISTRO SUPERIORE Dimensioni 2.04 x 5.28 x 0.015 m Area 8.14 m ² Restauri documentati <input checked="" type="checkbox"/> 1851: G. Bianchi restaura <input type="checkbox"/> 1907: D. Fiscali stacca l'affresco <input type="checkbox"/> 1930-1943: A. Benini restaura <input type="checkbox"/> 1942: ICR strappa l'affresco <input checked="" type="checkbox"/> 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto <input checked="" type="checkbox"/> 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano <input type="checkbox"/> 2007: A. Vigna restaura <input type="checkbox"/> 2014: OPD restaura e modifica supporto Restauro supporto <input type="radio"/> Si (2014, OPD) <input checked="" type="radio"/> No Supporto originale <input type="checkbox"/> Vetrosina (supporto sandwich) <input checked="" type="checkbox"/> Masonite tamburata <input type="checkbox"/> Masonite semi-tamburata <input type="checkbox"/> Rete metallica con gesso Nuovo supporto <input type="checkbox"/> Uno strato di masonite e aerolam <input type="checkbox"/> Rete metallica e aerolam <input type="checkbox"/> Vetrosina e aerolam		
REGISTRO INFERIORE Dimensioni 1.98 x 5.60 x 0.015 m Area 11.04 m ² Restauri documentati <input checked="" type="checkbox"/> 1851: G. Bianchi restaura <input type="checkbox"/> 1907: D. Fiscali stacca l'affresco <input type="checkbox"/> 1930-1943: A. Benini restaura <input type="checkbox"/> 1942: ICR strappa l'affresco <input checked="" type="checkbox"/> 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto <input checked="" type="checkbox"/> 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano <input type="checkbox"/> 2007: A. Vigna restaura <input type="checkbox"/> 2014: OPD restaura e modifica supporto Restauro supporto <input type="radio"/> Si (2014, OPD) <input checked="" type="radio"/> No Supporto Originale <input type="checkbox"/> Vetrosina (supporto sandwich) <input checked="" type="checkbox"/> Masonite tamburata <input type="checkbox"/> Masonite semi-tamburata <input type="checkbox"/> Rete metallica con gesso Nuovo supporto <input type="checkbox"/> Uno strato di masonite e aerolam <input type="checkbox"/> Rete metallica e aerolam <input type="checkbox"/> Vetrosina e aerolam		

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

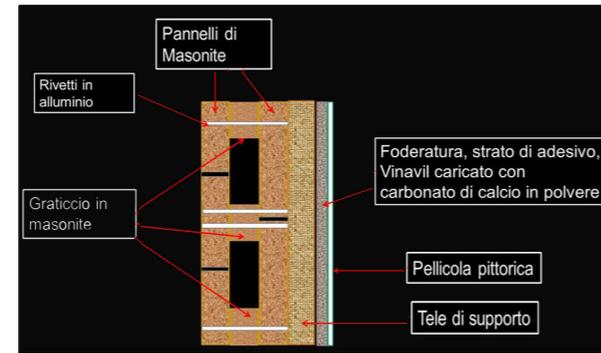
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO



0 1 m

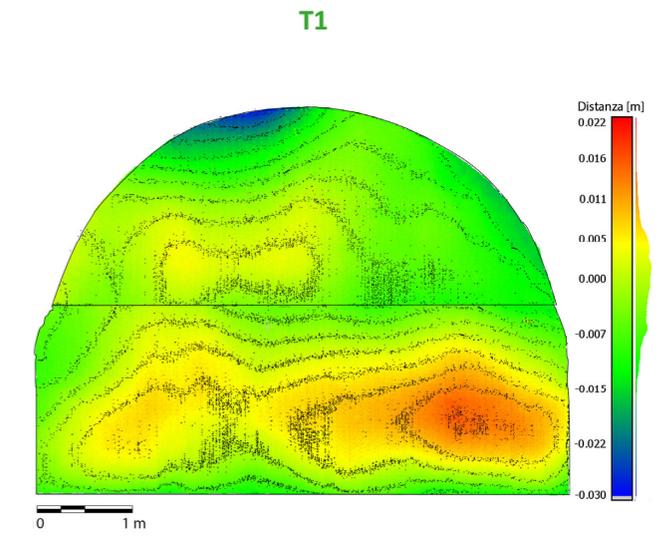
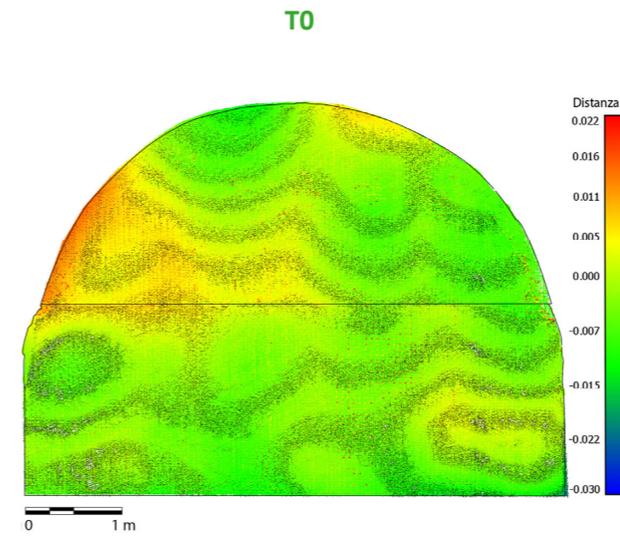
FOTOPIANO



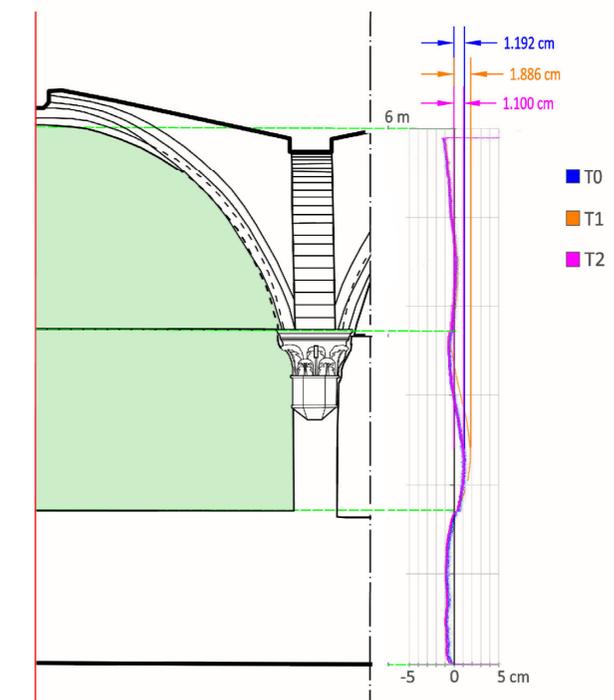
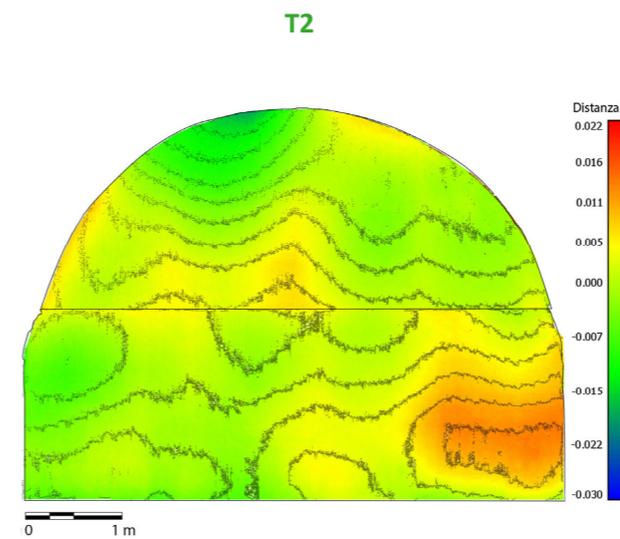
0 1 m

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



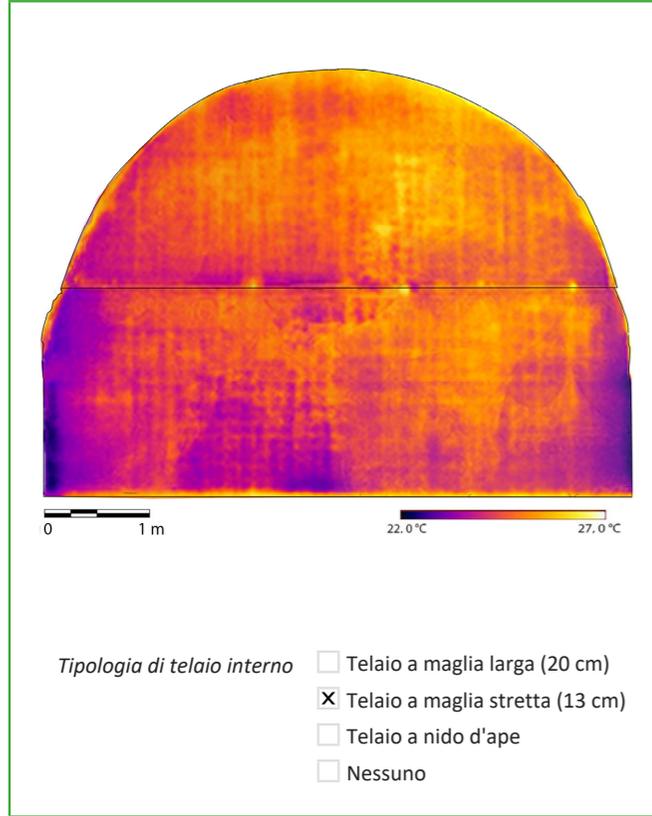
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 13 - 11½
- 11 - 9½
- 9 - 7½
- 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore Abramo e Lot lasciano l'Egitto e, vicino a Betel, si dividono; Lot si dirige verso Sodoma

Nome registro inferiore La guerra degli Elamiti contro la Pentapoli del Giordano; la cattura di Lot; Abramo libera Lot; La benedizione di Melchisedek e il giuramento di Abram

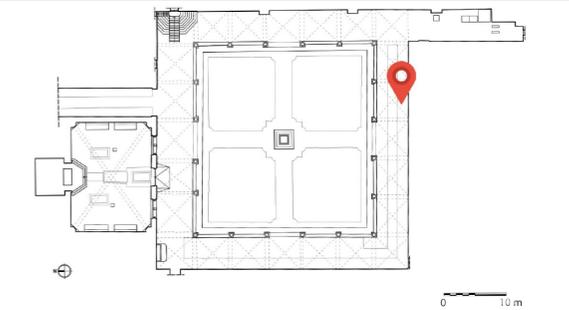
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-4

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-5

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Sud, 2° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.00 x 5.25 x 0.015 m Area 7.74 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale Vetrosesina (supporto sandwich)

- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto Uno strato di masonite e aerolam

- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e aerolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.03 x 5.53 x 0.015 m Area 11.17 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale Vetrosesina (supporto sandwich)

- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

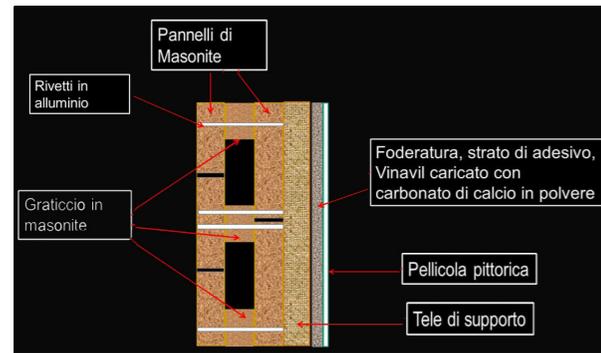
Nuovo supporto Uno strato di masonite e aerolam

- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e aerolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

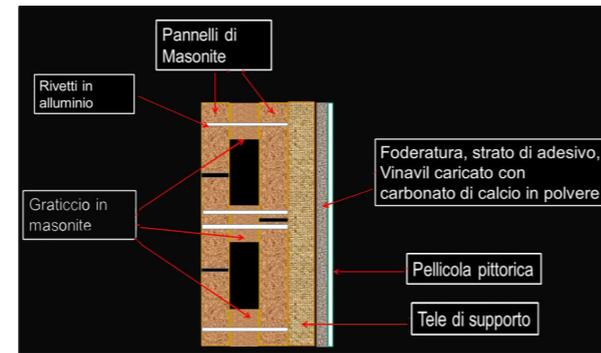
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

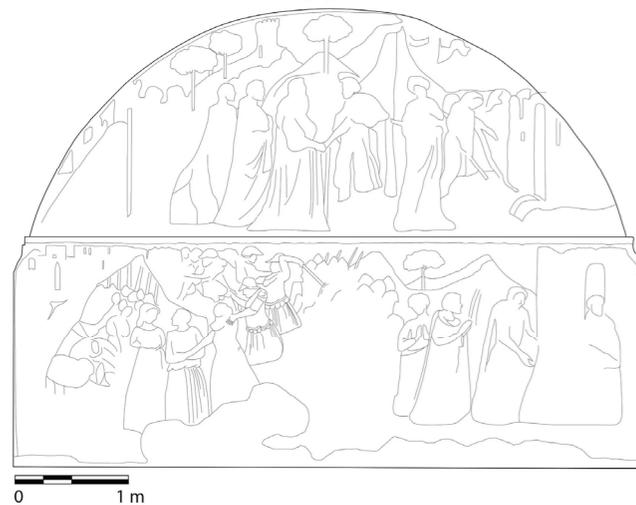
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

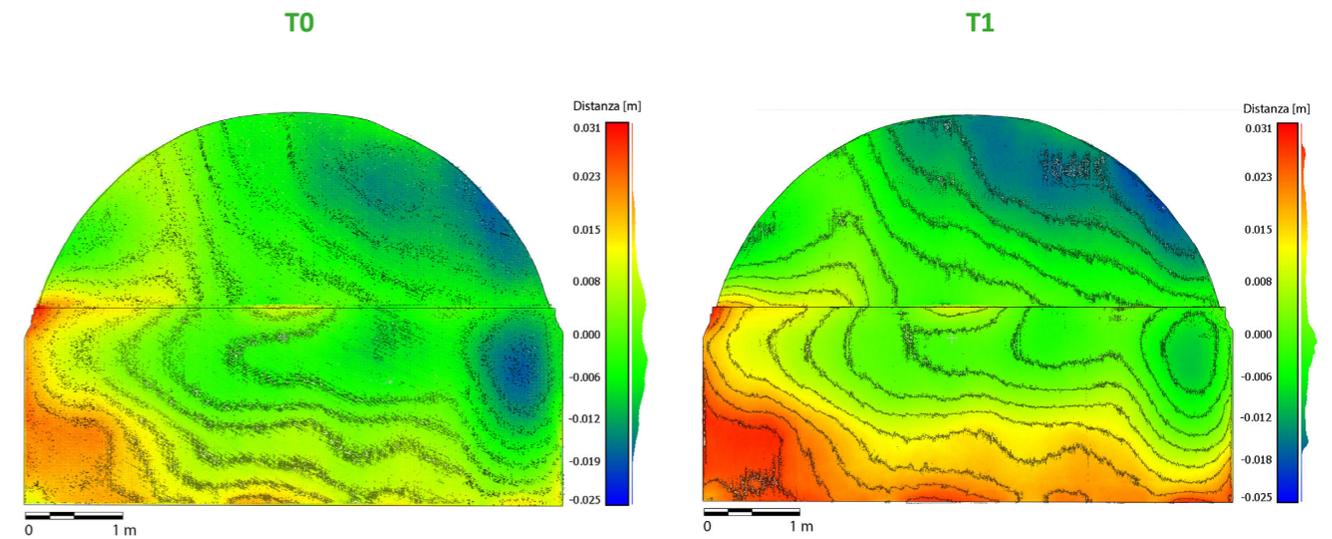


FOTOPIANO

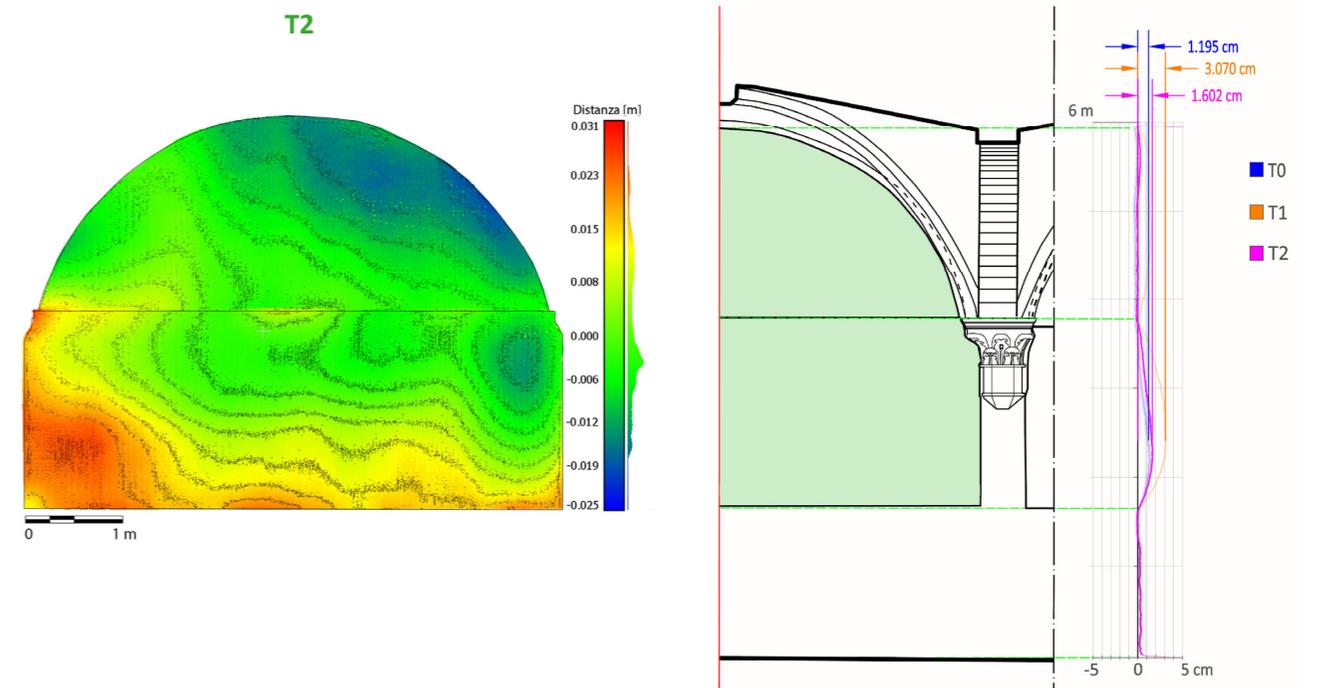


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



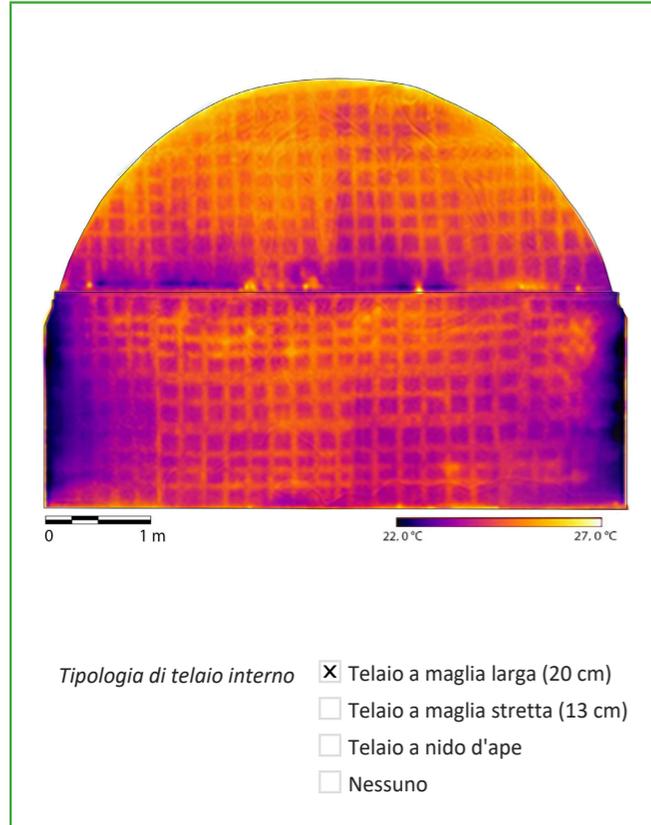
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimonto viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 9 - 7½
- 13 - 11½
- 7 - 5½
- 11 - 9½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore Tre angeli appaiono ad Abramo, che li ospita nella sua mensa; Sara apprende che partorerà un figlio

Nome registro inferiore La distruzione di Sodoma e la fuga di Lot verso Zoar

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-6

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-7

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Sud

3° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.10 x 5.35 x 0.015 m Area 8.43 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale Vetrosesina (supporto sandwich)
 Masonite tamburata
 Masonite semi-tamburata
 Rete metallica con gesso

Nuovo supporto Uno strato di masonite e aerolam
 Rete metallica e aerolam
 Vetrosesina e aerolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.00 x 5.89 x 0.015 m Area 11.58 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

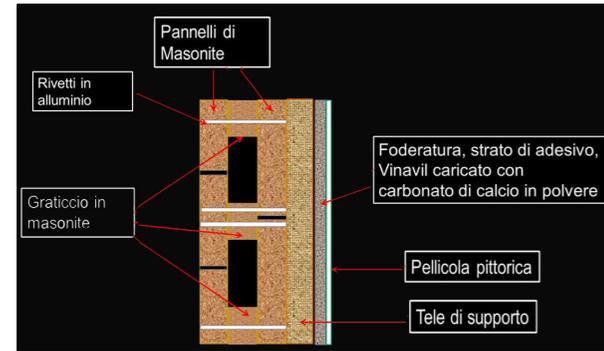
Supporto Originale Vetrosesina (supporto sandwich)
 Masonite tamburata
 Masonite semi-tamburata
 Rete metallica con gesso

Nuovo supporto Uno strato di masonite e aerolam
 Rete metallica e aerolam
 Vetrosesina e aerolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

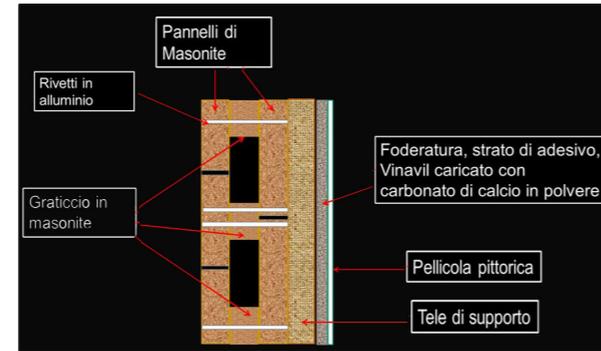
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (Ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (Ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

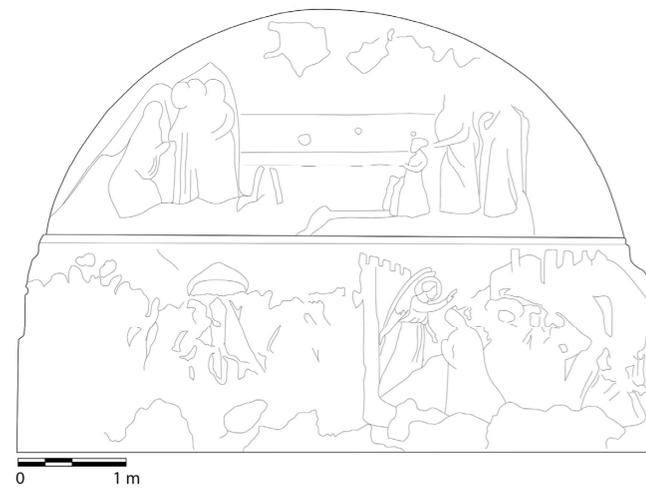
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (Ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (Ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

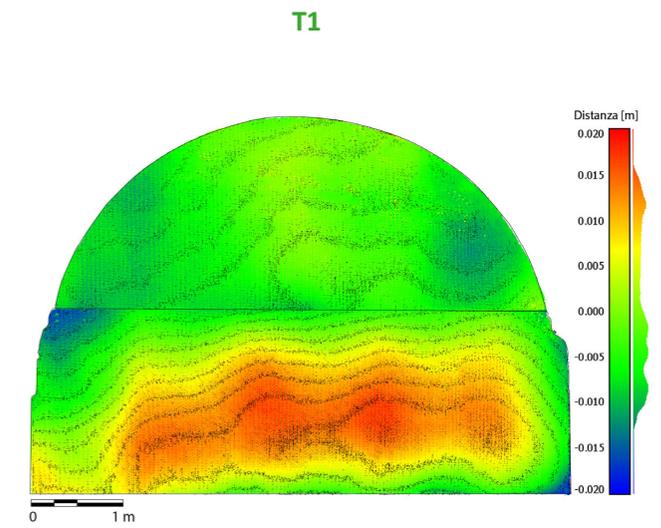
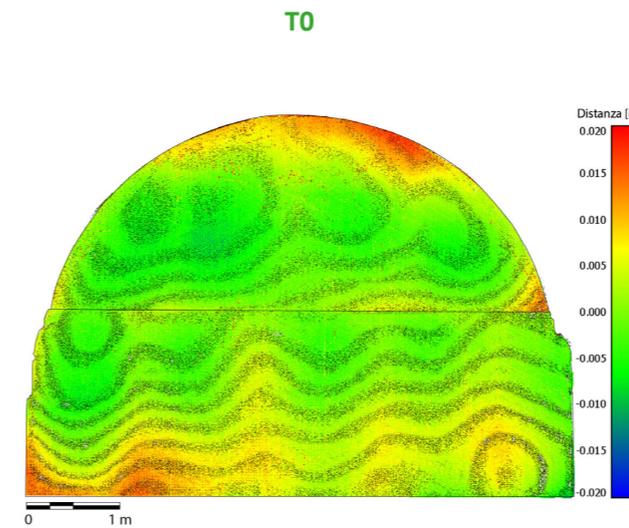


FOTOPIANO

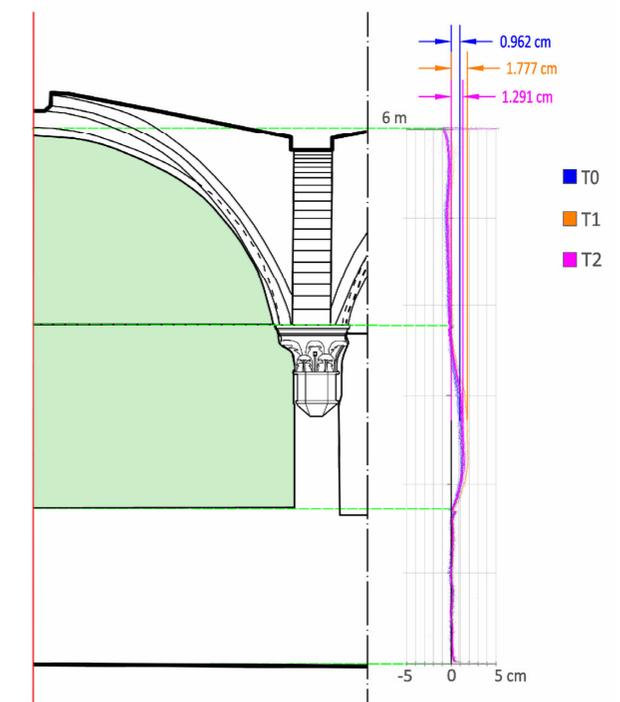
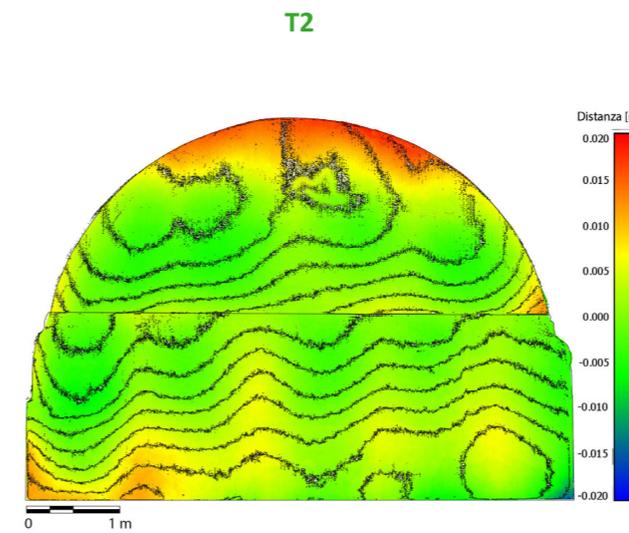


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



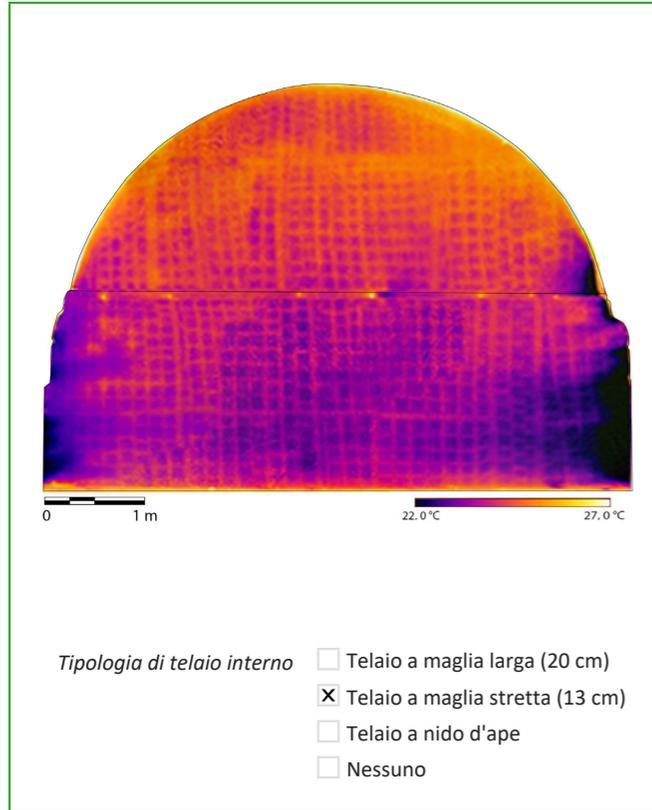
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 9 - 7½
- 13 - 11½
- 7 - 5½
- 11 - 9½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore Litigio tra Isacco e Ismaele; Sara chiede ad Abramo di cacciare Ismaele, l'angelo del Signore appare ad Agar

Nome registro inferiore L'angelo del Signore ordina ad Abramo di sacrificare Isacco; Abramo si avvia verso la terra di Moria

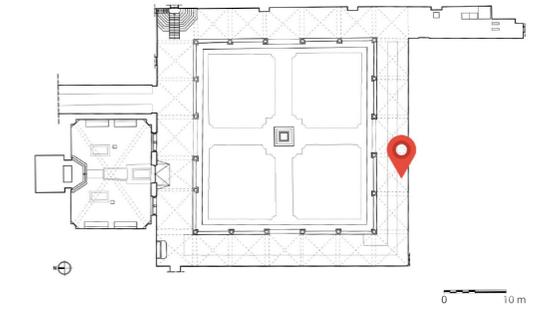
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-8

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-9

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Sud

4° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.21 x 5.32 x 0.015 m Area 8.70 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.00 x 5.63 x 0.015 m Area 11.22 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

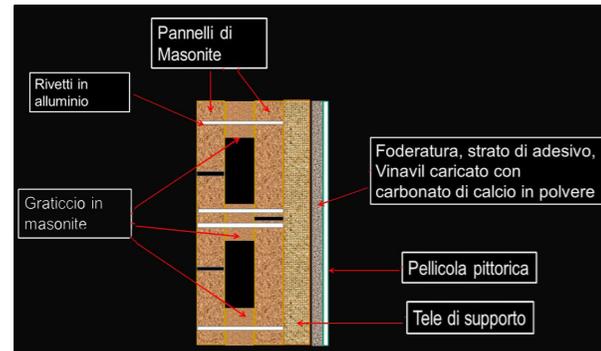
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

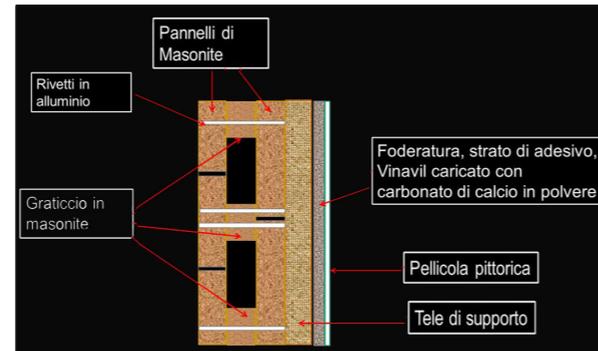
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

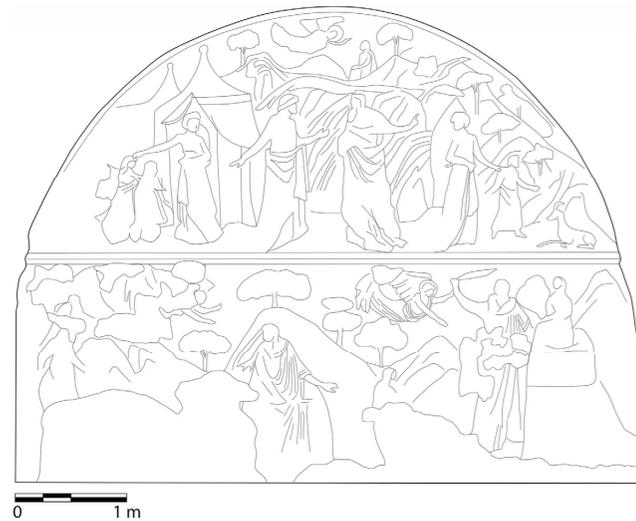
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

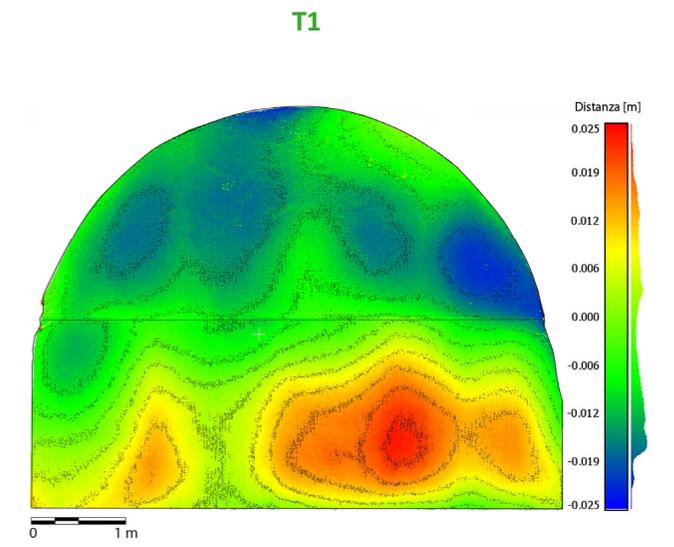
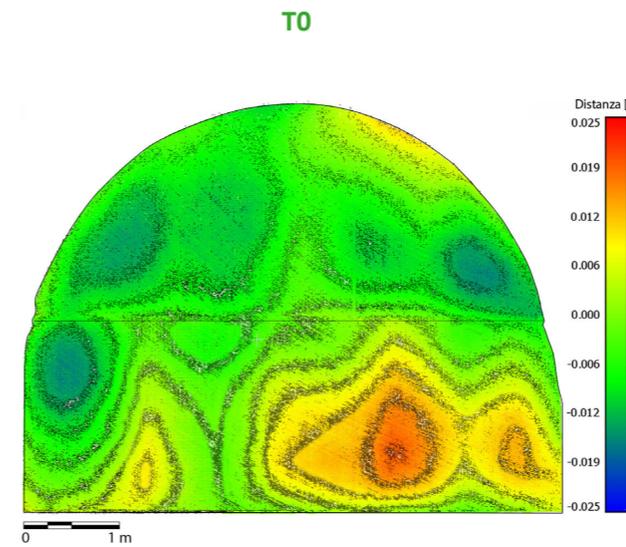


FOTOPIANO

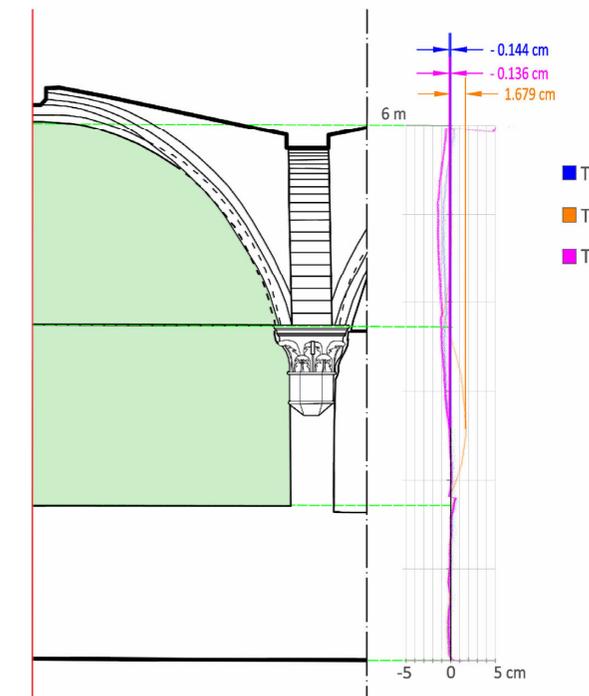
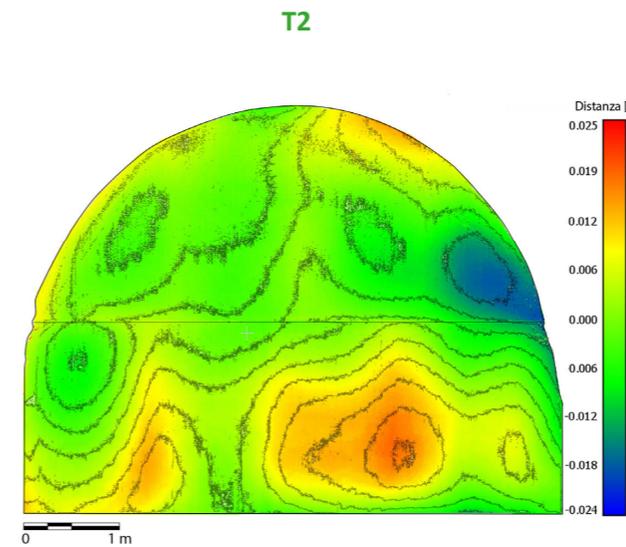


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



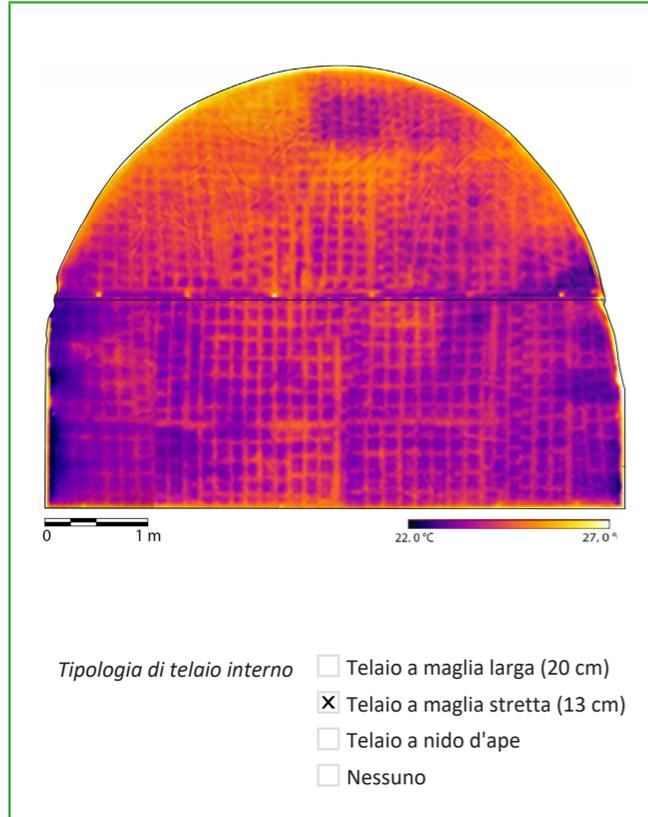
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 9 - 7½
- 13 - 11½
- 7 - 5½
- 11 - 9½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore La morte di Sara, Abramo compra la tomba per seppellirla

Nome registro inferiore Il giuramento di Eliezer, che parte alla ricerca di una moglie per Isacco; la preghiera di Eliezer; Rebecca riceve i doni di Eliezer

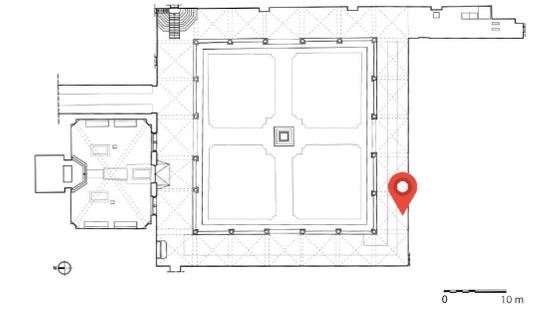
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-10

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-11

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Sud 5° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.19 x 5.22 x 0.015 m Area 11.20 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.06 x 5.57 x 0.015 m Area 8.58 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

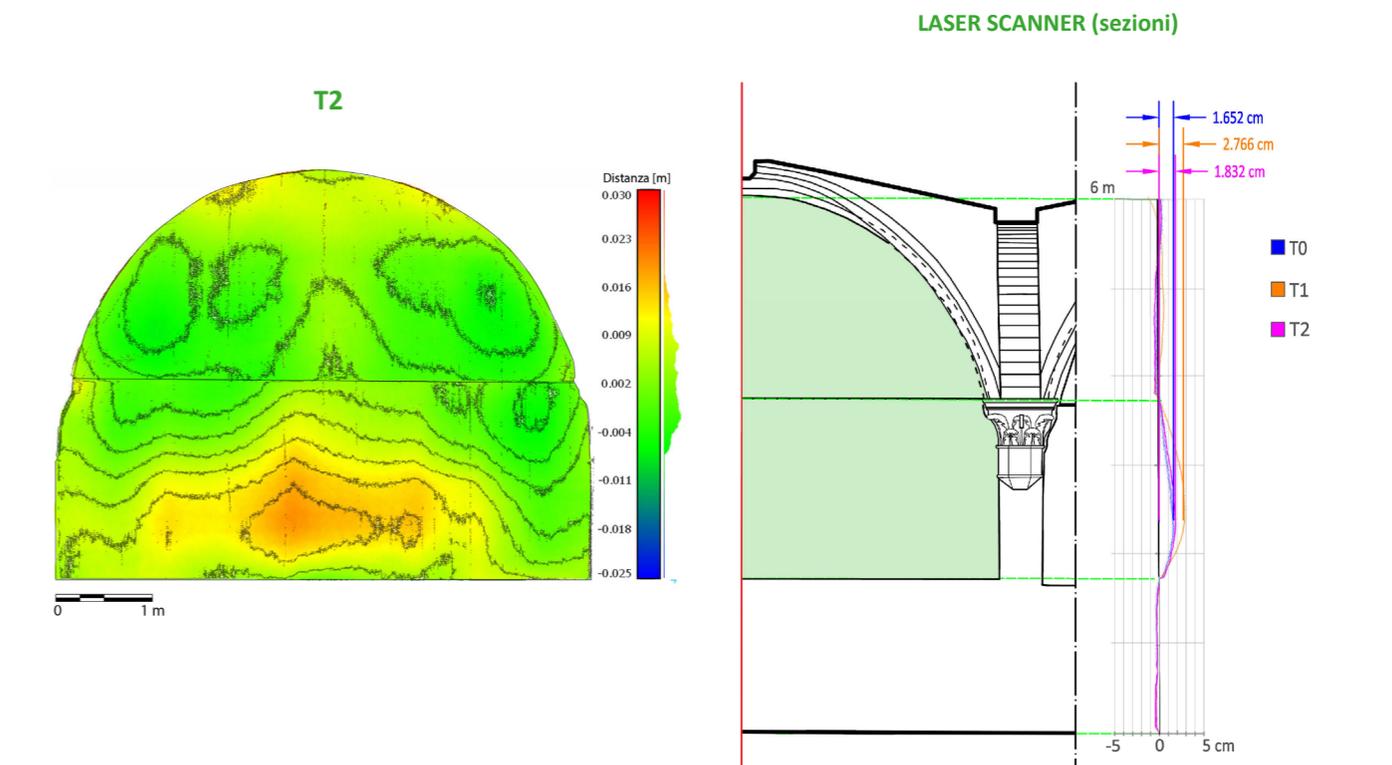
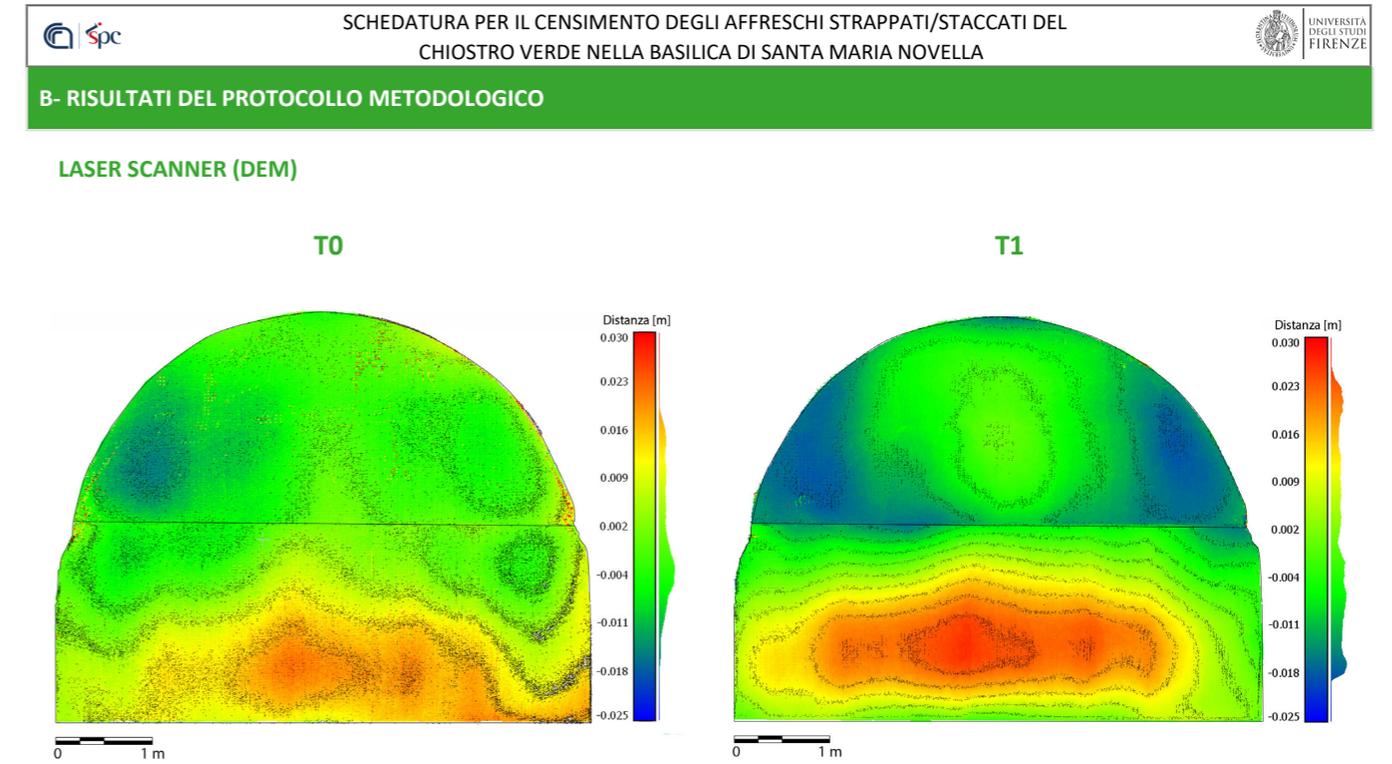
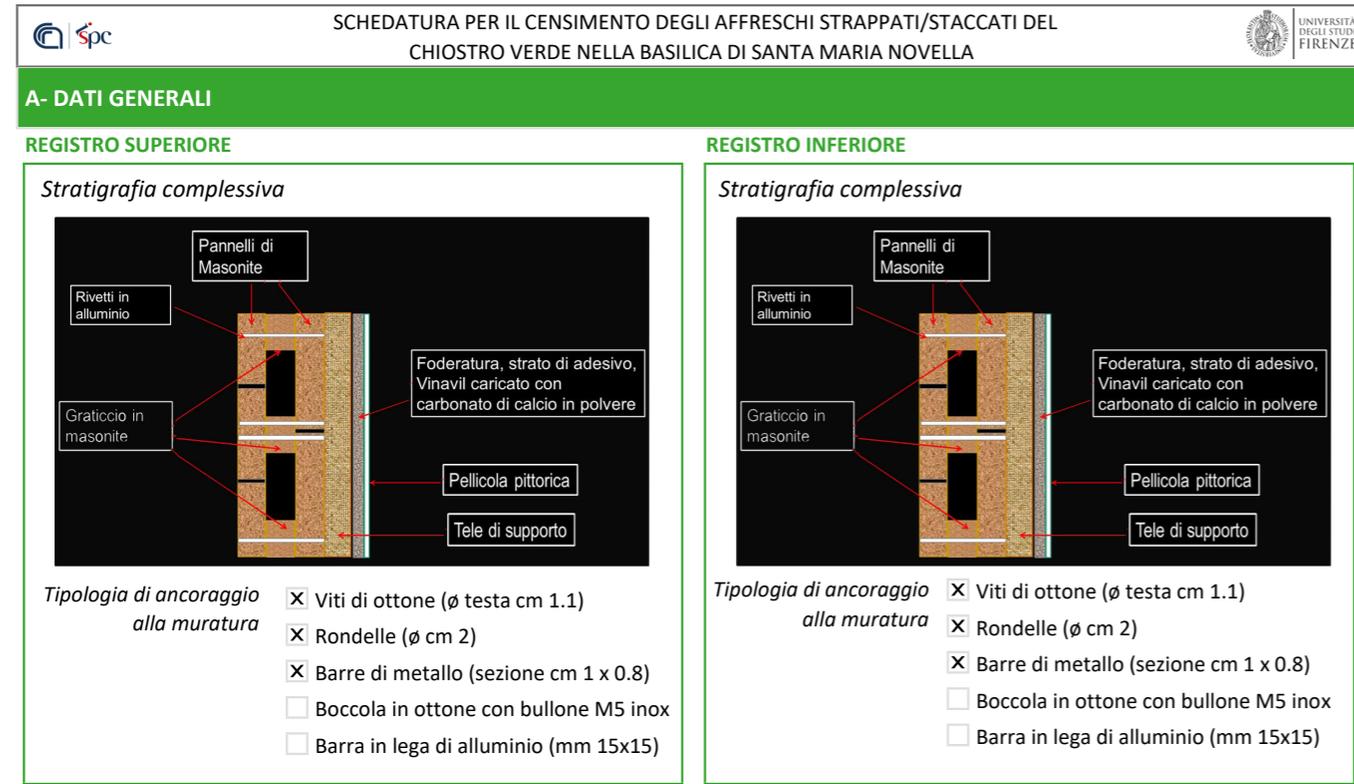
Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

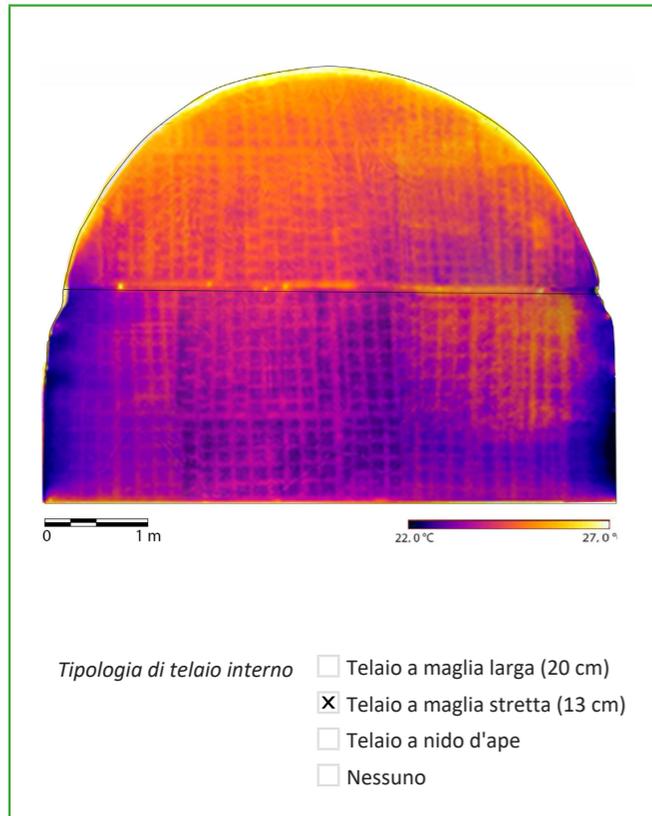
- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimonto viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 13 - 11½
- 11 - 9½
- 9 - 7½
- 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore L'incontro tra Isacco e Rebecca

Nome registro inferiore La morte di Abramo

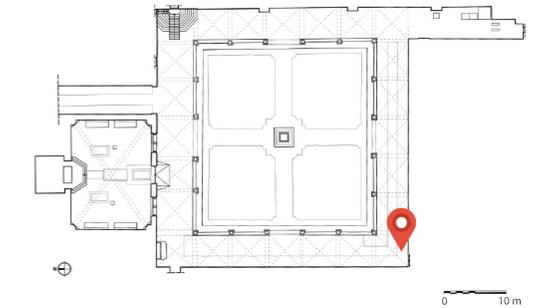
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-12

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-13

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Sud

6° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.16 x 4.89 x 0.015 m Area 7.97 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e aerolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.02 x 4.14 x 0.015 m Area 6.92 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

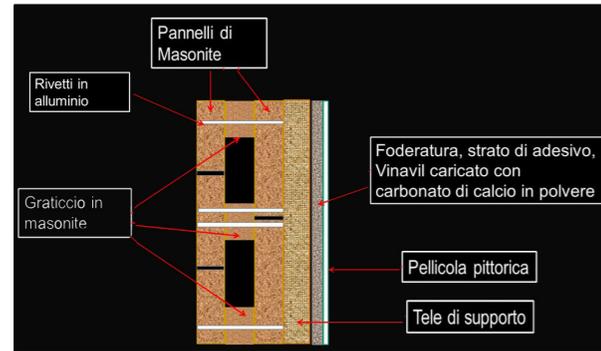
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e aerolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

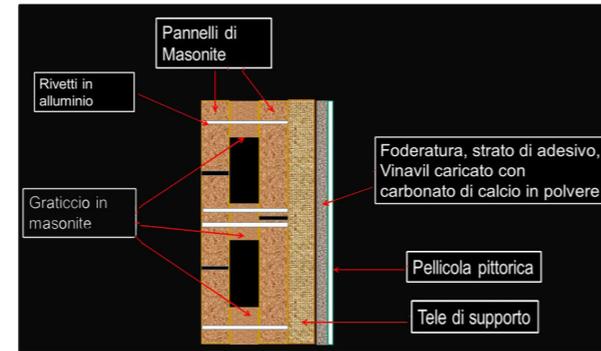
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

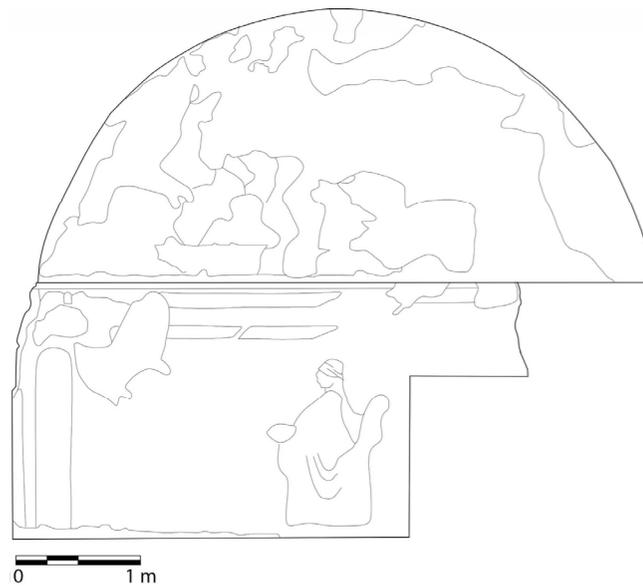
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

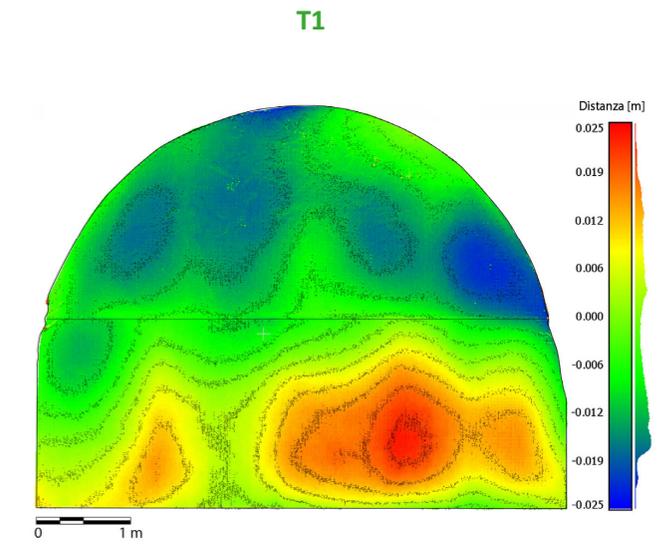
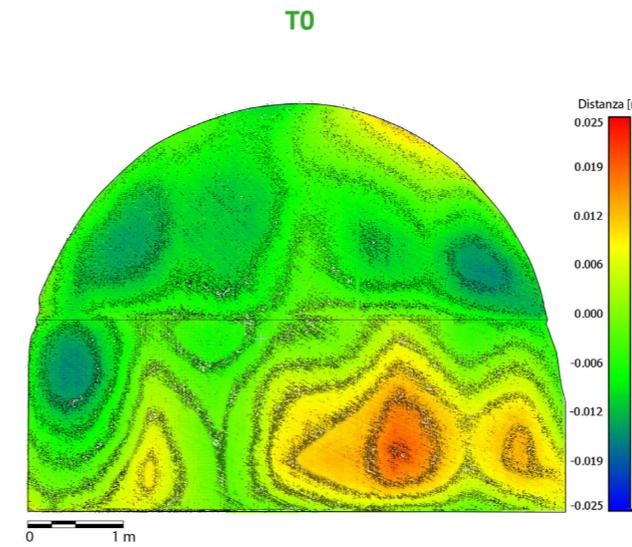


FOTOPIANO

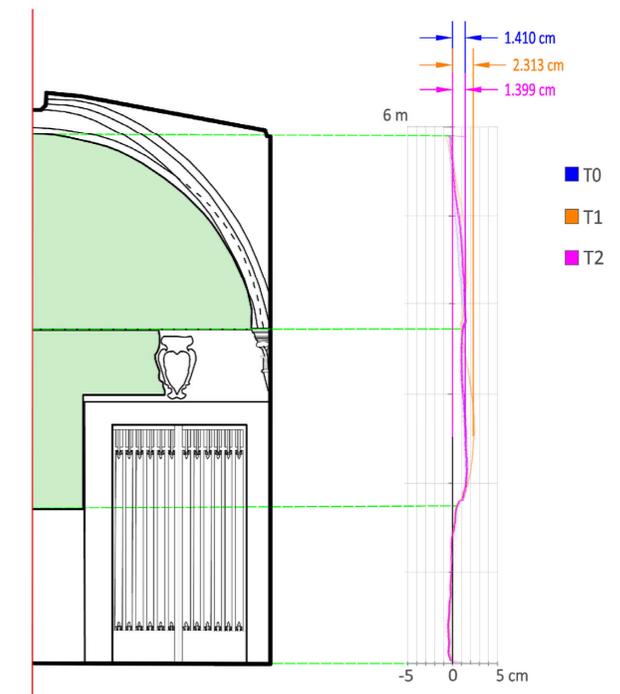
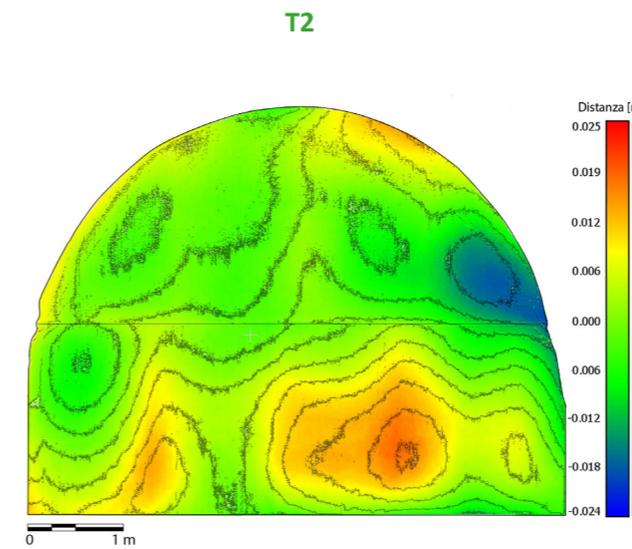


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



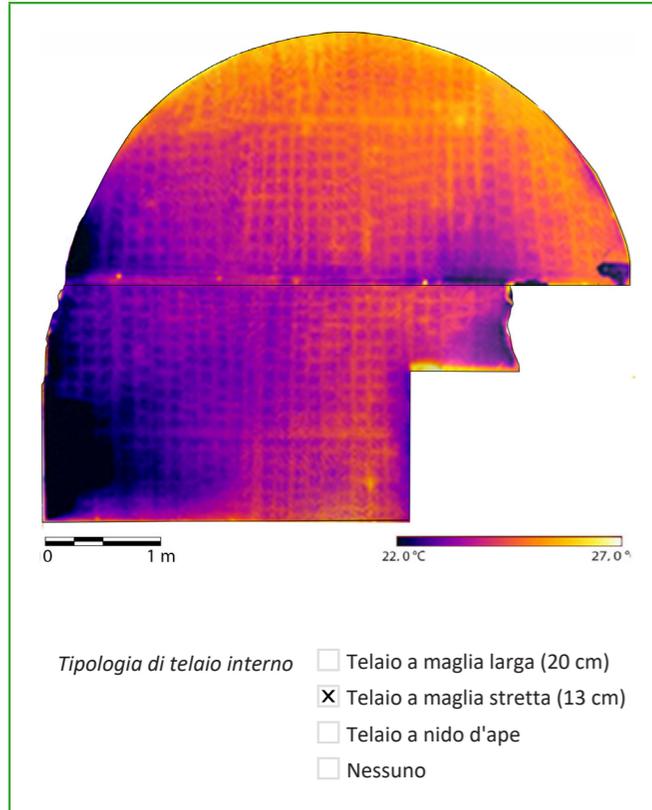
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 13 - 11½
- 11 - 9½
- 9 - 7½
- 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. OPD restauro 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore Rebecca partorisce Esaù e Giacobbe; Esaù vende a Giacobbe la primogenitura

Nome registro inferiore Dio appare ad Abramo nella valle di Sichem; Abramo vi edifica un altare, quindi pianta una tenda tra Ai e Betel

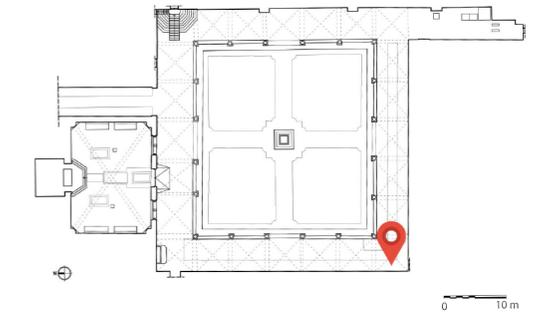
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-14

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-15

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Ovest, 1° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.14 x 4.84 x 0.015 m Area 8.61 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.06x 4.84 x 0.015 m Area 10.92 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

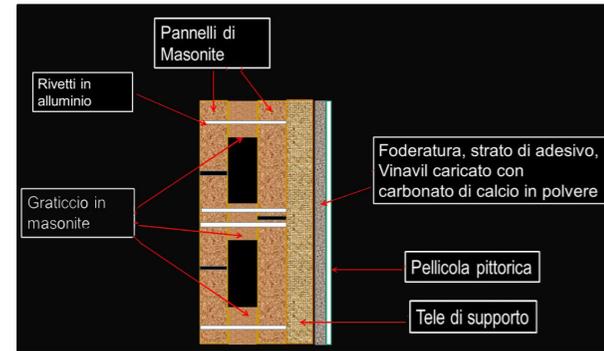
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

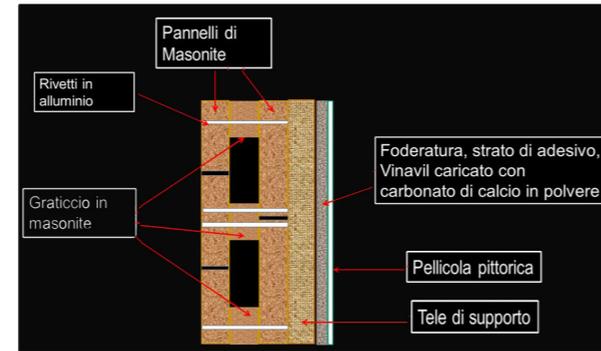
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

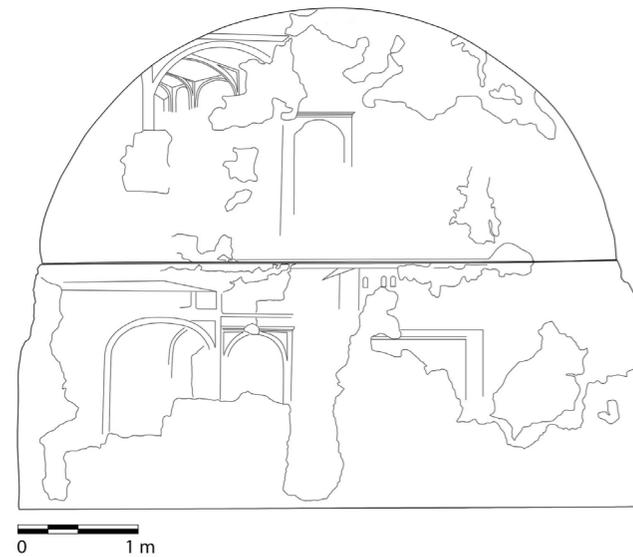
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

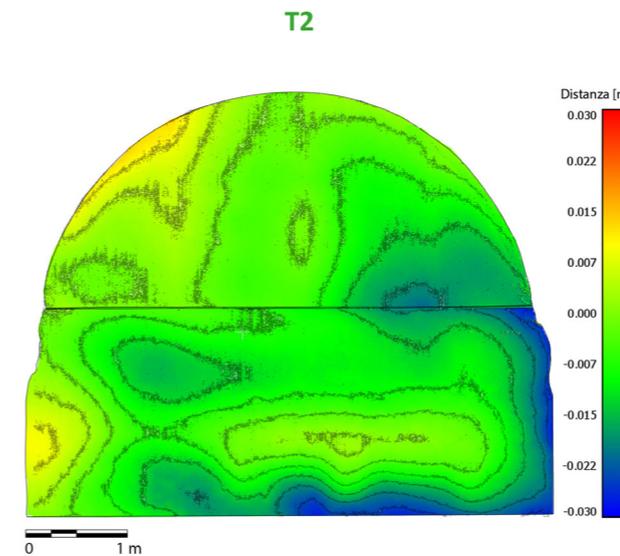
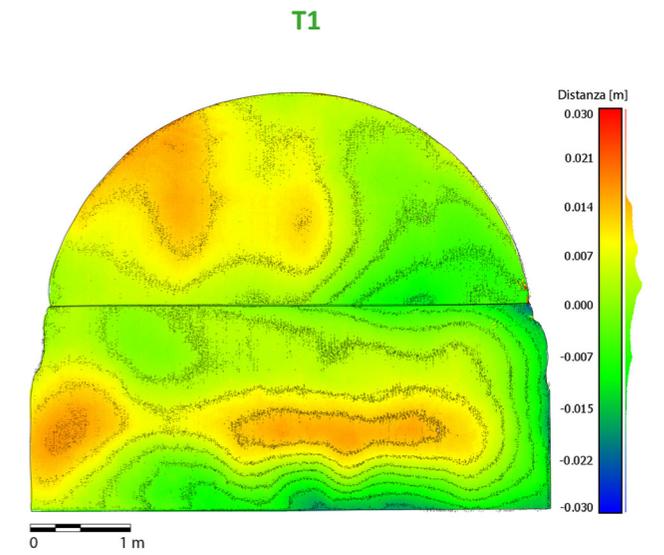
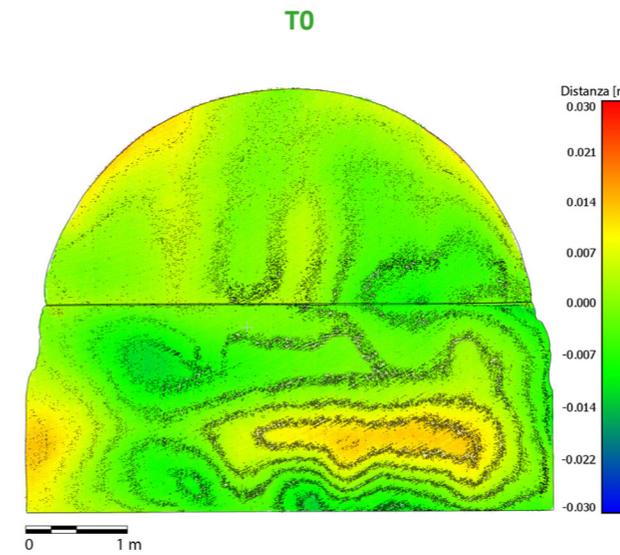


FOTOPIANO

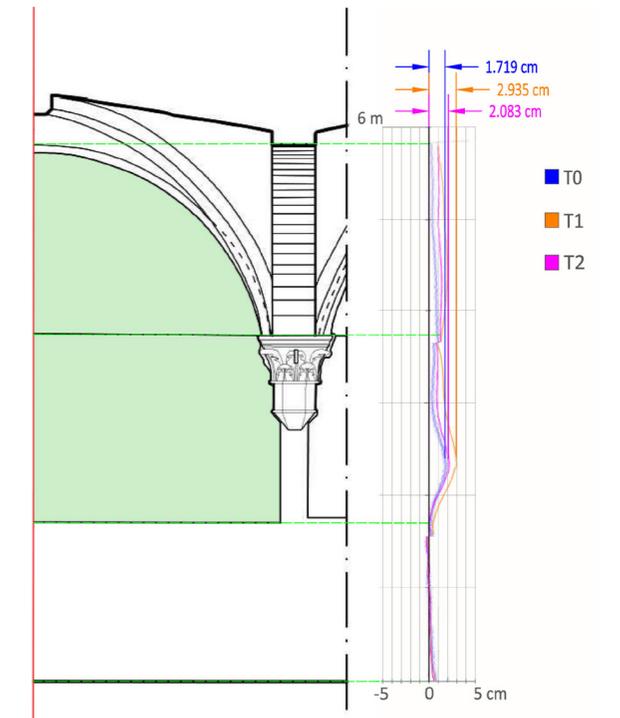


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



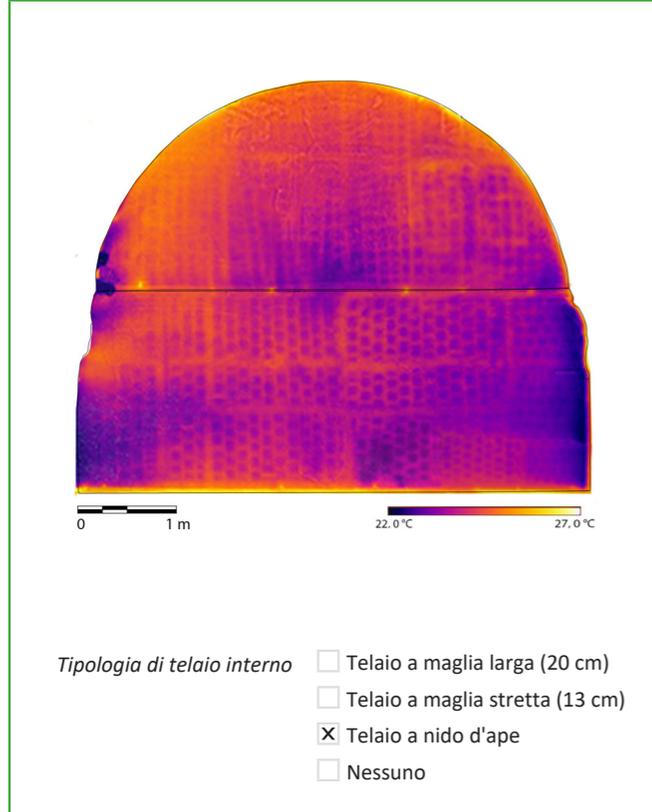
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimonto viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 9 - 7½
- 13 - 11½
- 7 - 5½
- 11 - 9½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 10/20/2023

Nome registro superiore L'incontro tra Giacobbe e Rachele, che corre ad avvisare Làbano, Rachele e Lia accolgono Giacobbe

Nome registro inferiore Il banchetto per le nozze di Giacobbe; Làbano da a Giacobbe Lia in sposa

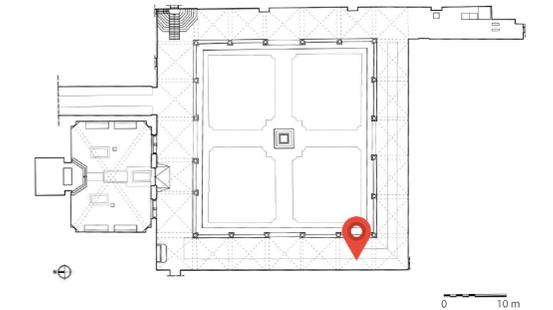
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281148-16

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-17

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Ovest, 2° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.04 x 4.86 x 0.015 m Area 7.91 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetroresina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetroresina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.03 x 5.28 x 0.015 m Area 10.74 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetroresina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

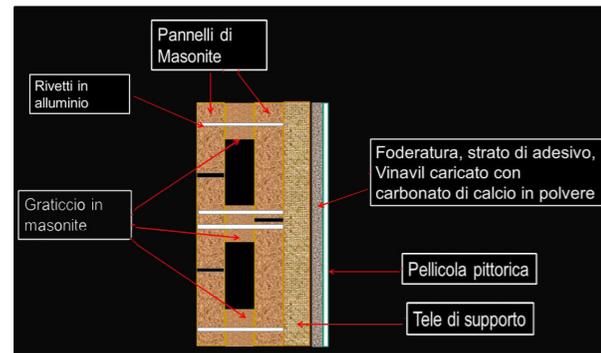
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetroresina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

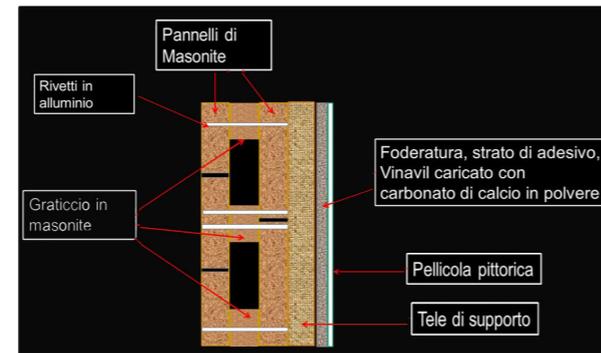
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

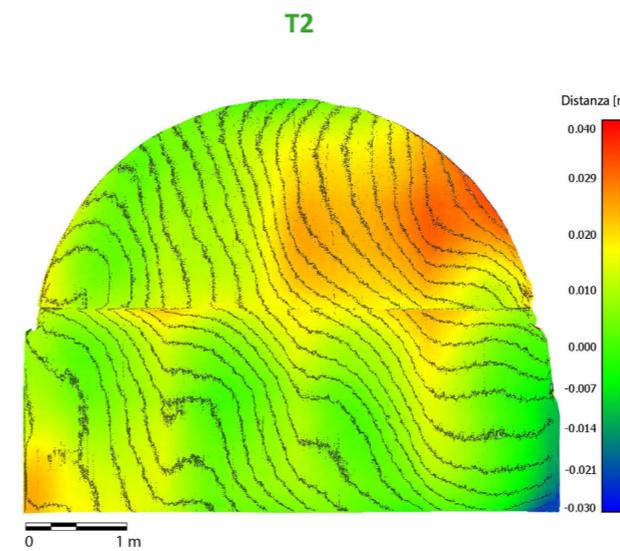
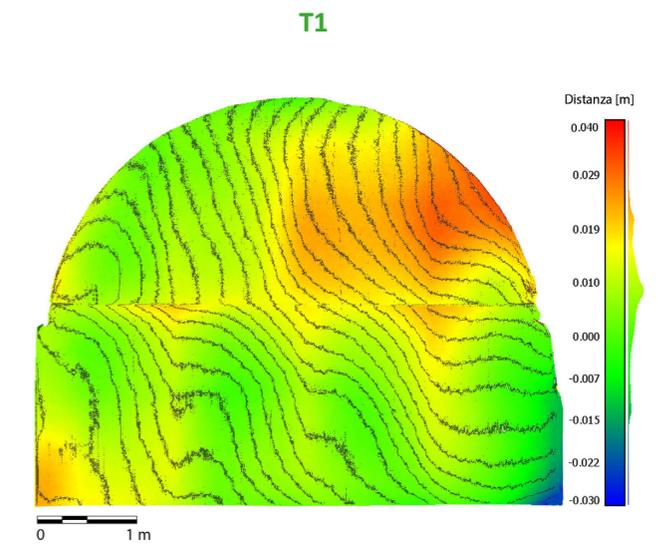
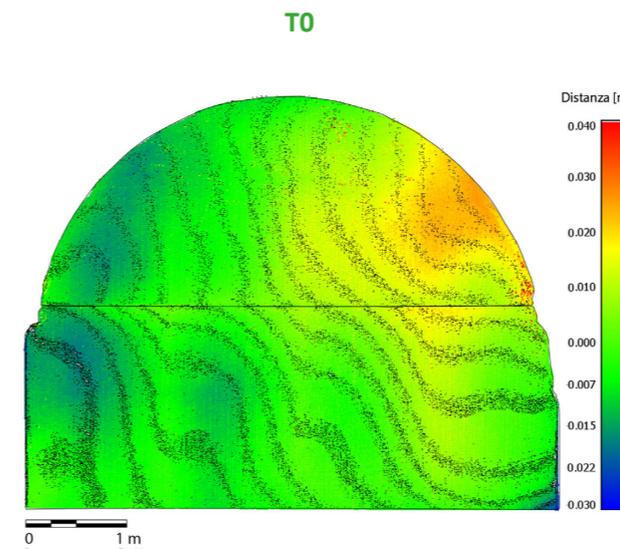


FOTOPIANO

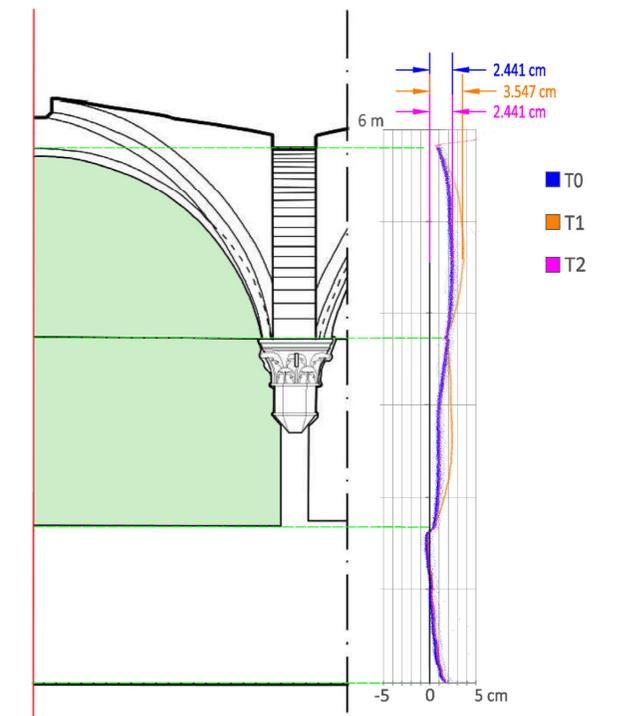


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)

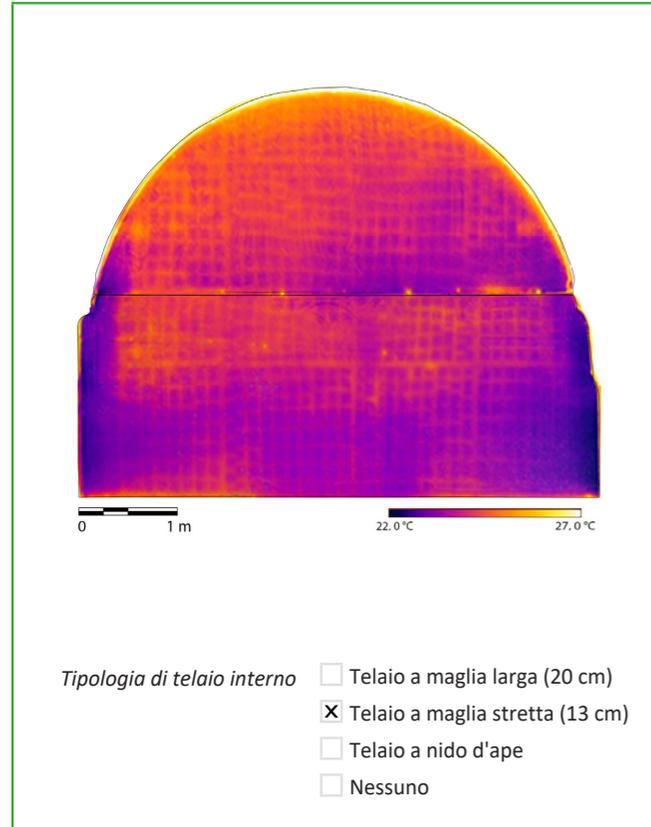


LASER SCANNER (sezioni)



B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 9 - 7½
- 13 - 11½
- 7 - 5½
- 11 - 9½

*OSSERVAZIONI

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. OPD restauro 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

A- DATI GENERALI

Operatore Sofia Brizzi

Data 11/11/2023

Nome registro superiore *Nozze di Giacobbe con Rachele e nascita dei figli delle schiave Bila e Zilp*

Nome registro inferiore *Giacobbe si accomiata da Làbano e accrescimento del gregge di Giacobbe*

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-
Reg. superiore 0900281148-18

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-
Reg. inferiore 0900281148-19

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato

LOCALIZZAZIONE

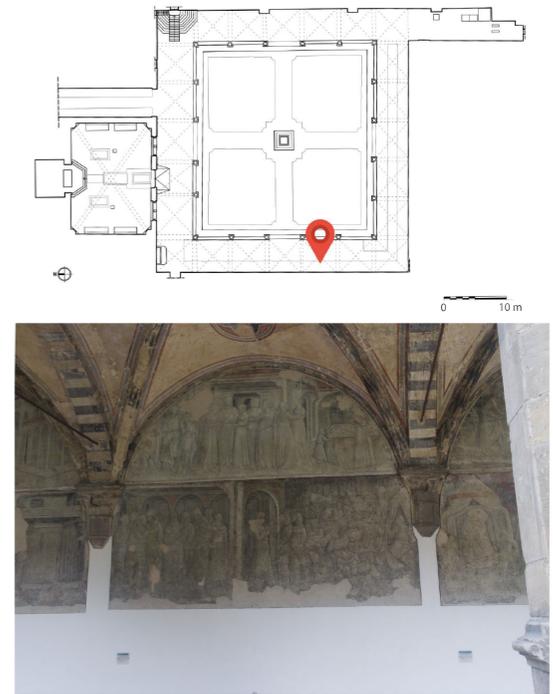
Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Ovest, 3° campata



REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.00 x 4.83 x 0.015 m Area 7.52 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.03 x 5.26 x 0.015 m Area 10.69 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

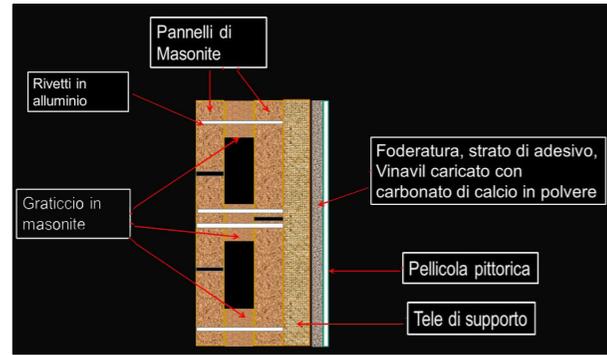
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

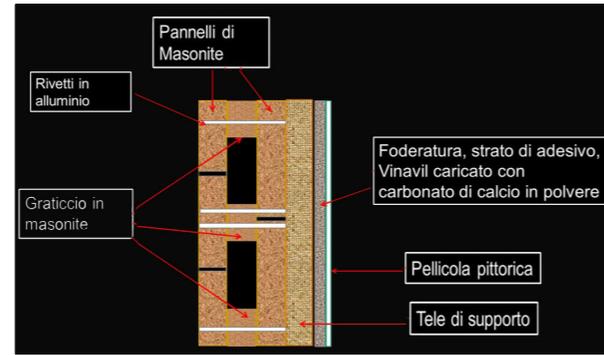
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

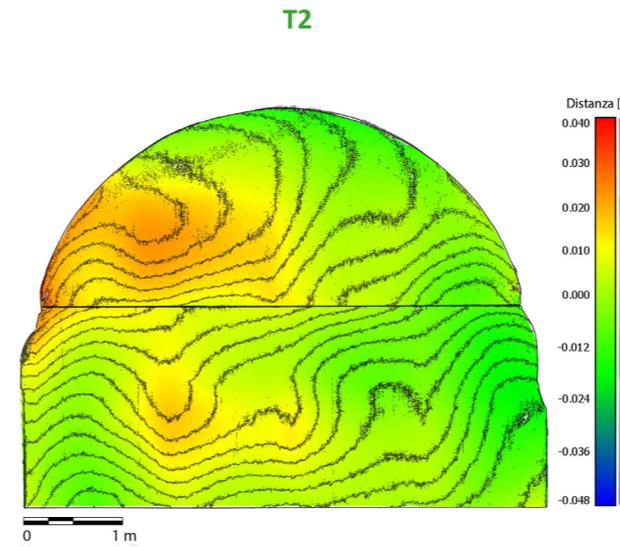
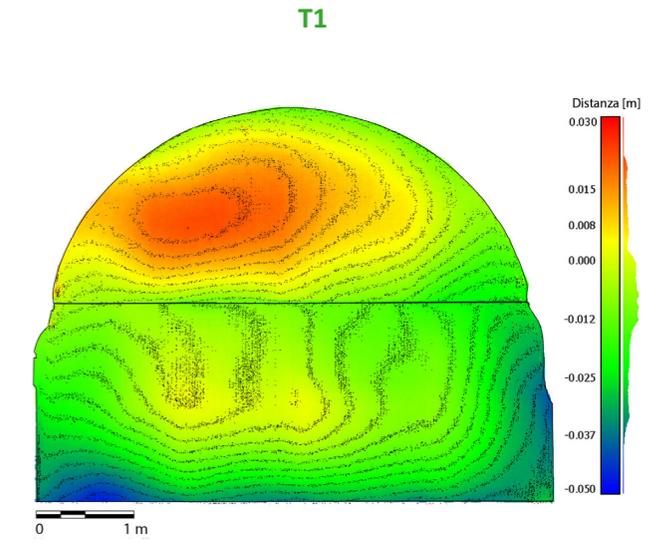
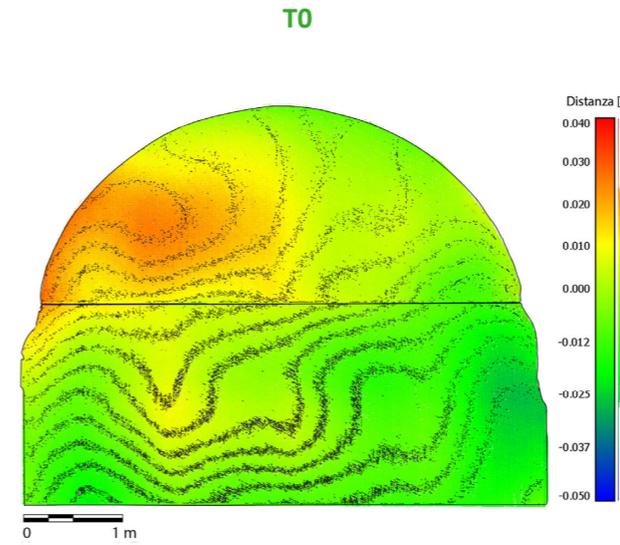


FOTOPIANO

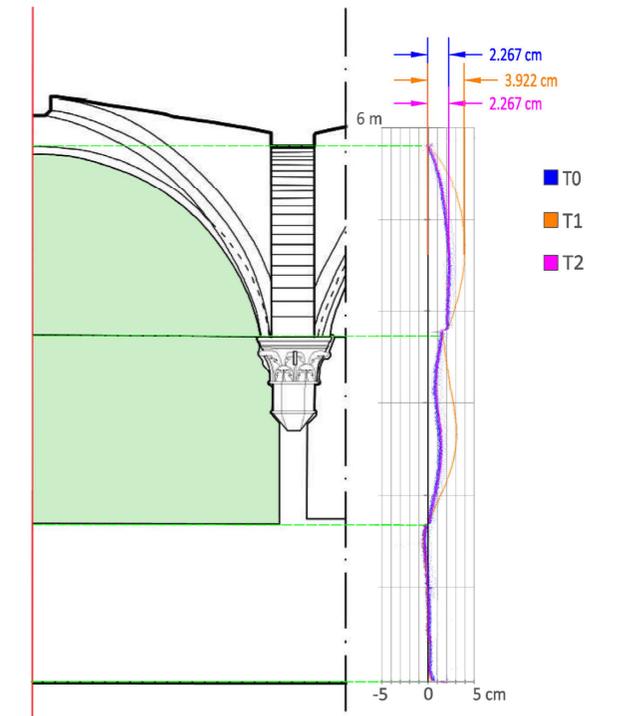


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)

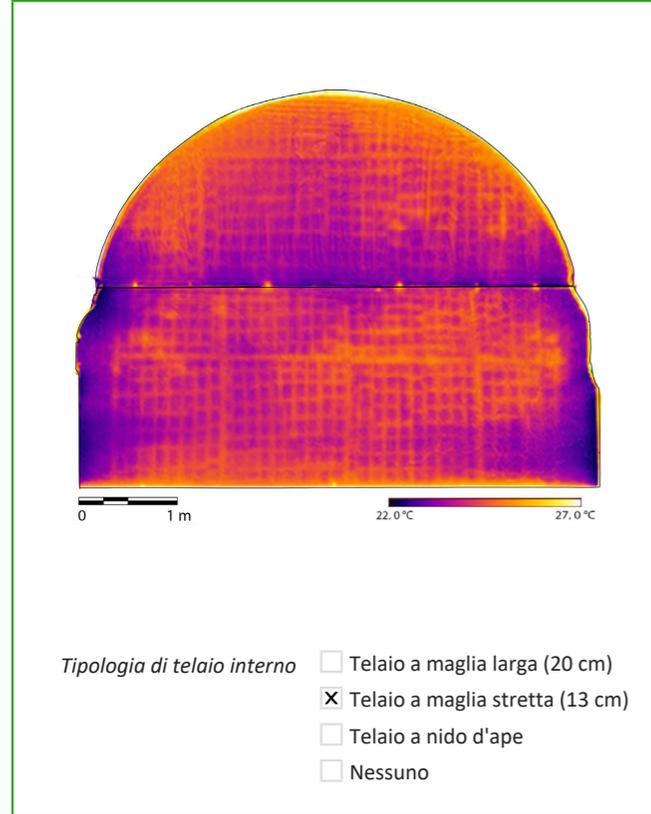


LASER SCANNER (sezioni)



B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

- Stato di conservazione
- Deformazioni localizzate
 - Sconnessioni fuori dal piano
 - Pulvirulenza
 - Esfoliazioni localizzate
 - Efflorescenze localizzate
 - Sollevamenti di colore
 - Alterazione del colore
 - Formazioni di cretti a reticolo
 - Disconnessioni telaio interno
 - Stuccature e ritocchi
 - Decimento viti di ancoraggio
 - Variazioni di tonalità/inscurimento
 - Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 13 - 11½
- 11 - 9½
- 9 - 7½
- 7 - 5½

*OSSERVAZIONI

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. OPD restauro 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

A- DATI GENERALI

Operatore Sofia Brizzi

Data 11/11/2023

Nome registro superiore: Giacobbe in fuga verso Canaan con la famiglia e le greggi

Nome registro inferiore: Dio appare in sogno a Labano, Labano raggiunge Giacobbe e ricerca nel suo accampamento gli idoli rubati da Rachele

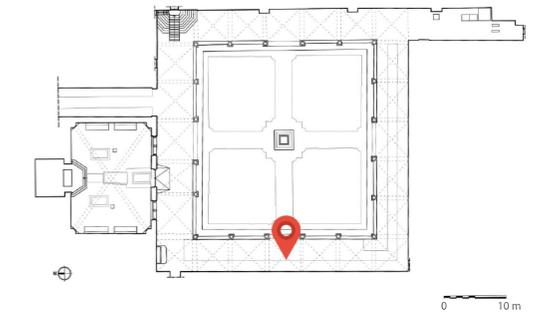
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore: 0900281148-20

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore: 0900281148-21

Autore: Ignoto pittore fiorentino

Anno: 1425-1449

Ente competente per la tutela: SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione: Italia

Regione NUTS2: Toscana

Città: Firenze

Complesso architettonico: Basilica di Santa Maria Novella

Area: Chiostro Verde, lato Ovest, 4° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni: 2.09 m x 4.86 m x 0.015 Area: 7.78 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni: 2.02 m x 5.45 m x Area: 10.85 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

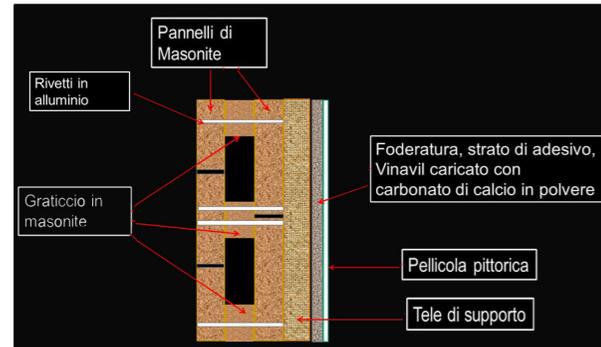
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

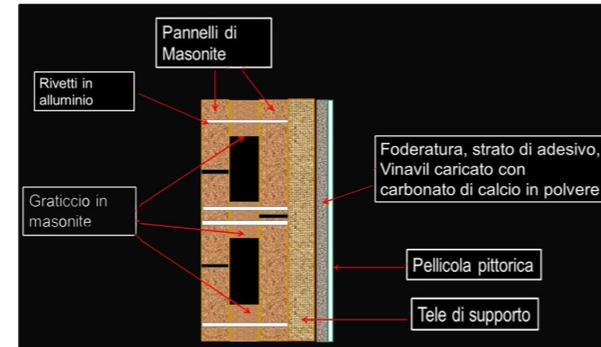
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

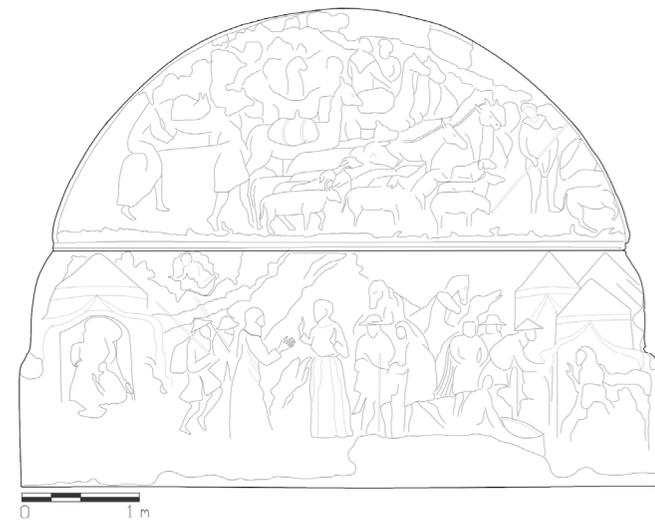
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

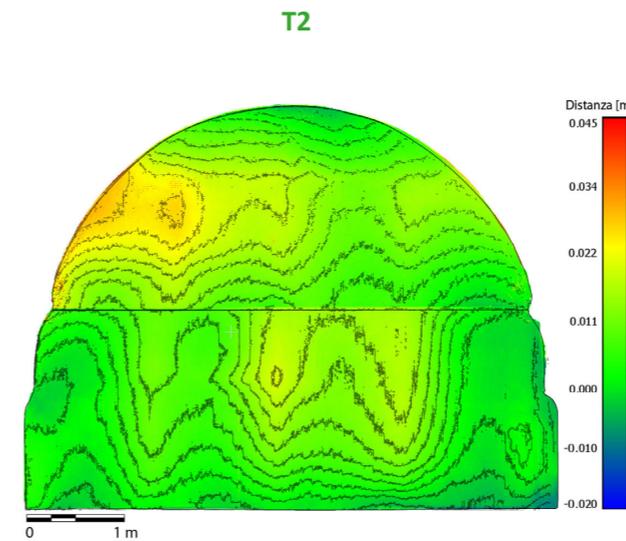
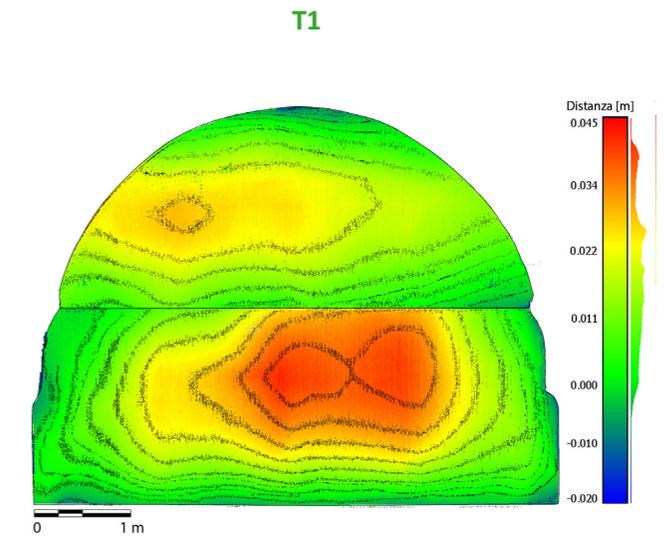
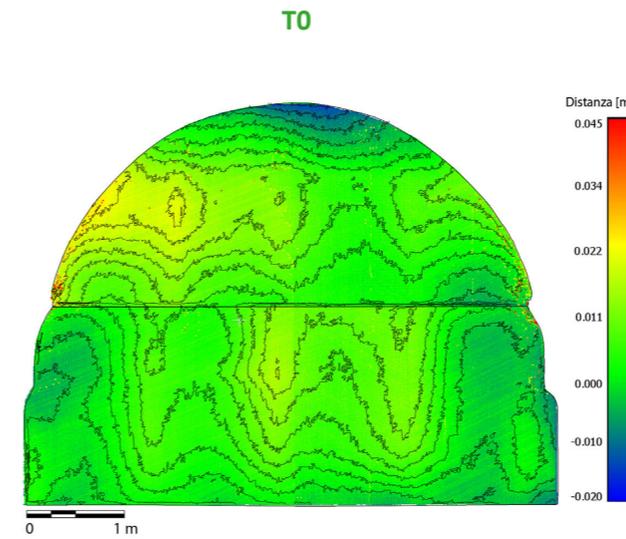


FOTOPIANO

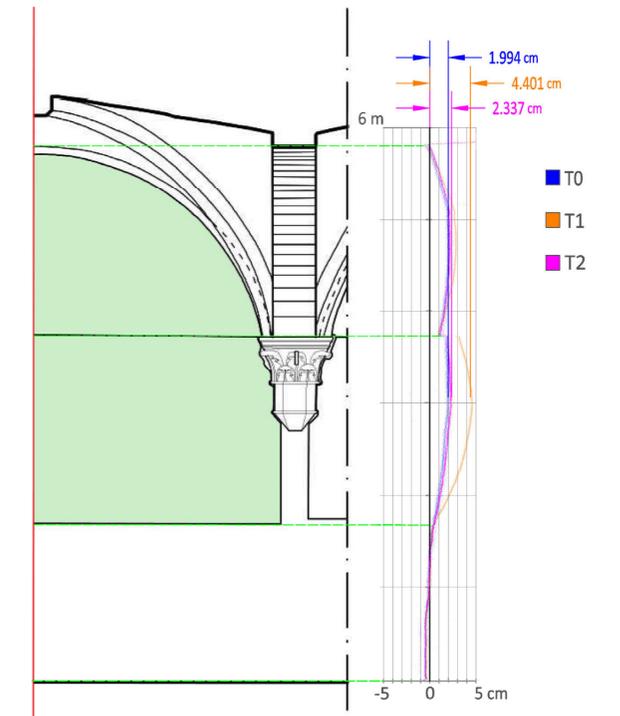


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



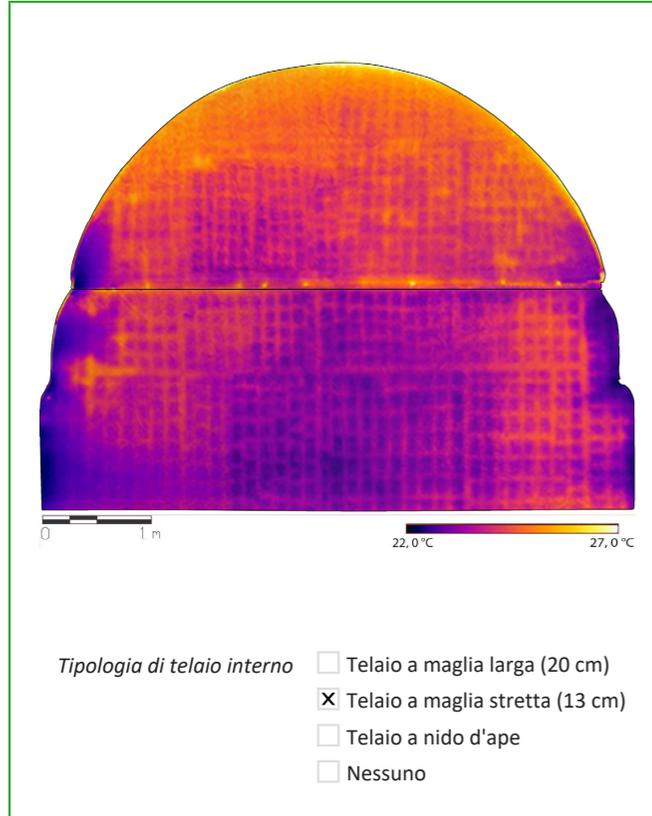
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Sì No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 13 - 11½
- 11 - 9½
- 9 - 7½
- 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore: Giacobbe e la sua famiglia si recano in Egitto, angeli appaiono a Giacobbe, Giacobbe manda doni al fratello Esaù

Nome registro inferiore: Lotta con l'angelo, incontro di Esaù e Giacobbe

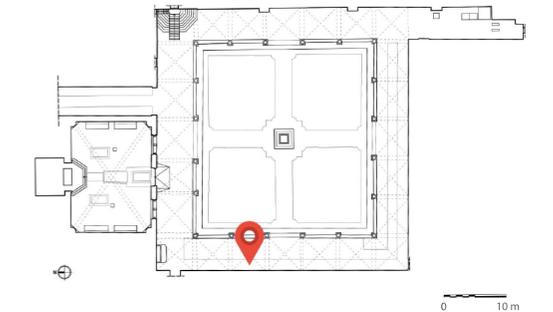
Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore: 0900281148-22

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore: 0900281148-23

Autore: Ignoto pittore fiorentino

Anno: 1425-1449

Ente competente per la tutela: SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione: Italia

Regione NUTS2: Toscana

Città: Firenze

Complesso architettonico: Basilica di Santa Maria Novella

Area: Chiostro Verde, lato Ovest, 5° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni: 2.03 x 5.34 x 0.015 m Area: 7.33 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restaurato supporto Sì (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetroresina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetroresina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni Area: 10.95 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restaurato supporto Sì (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetroresina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

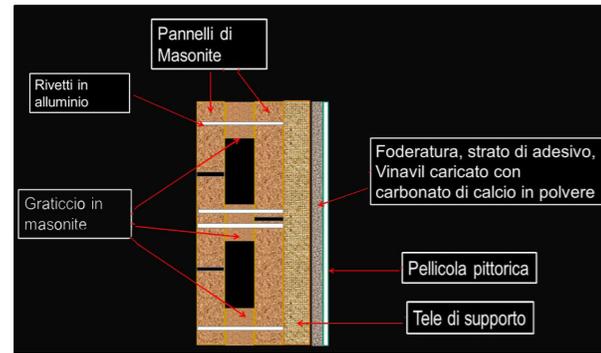
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetroresina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

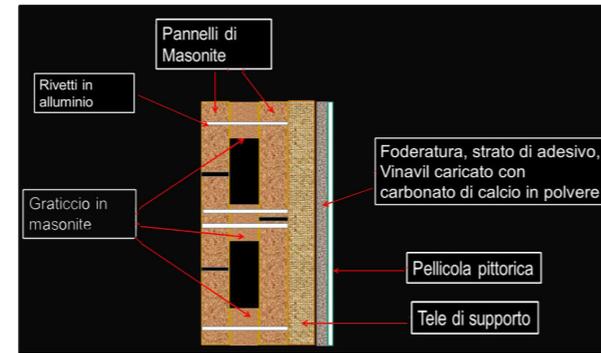
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

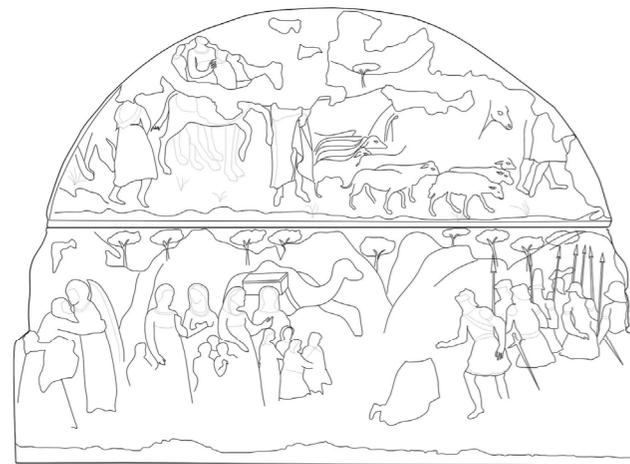
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ϕ testa cm 1.1)
 - Rondelle (ϕ cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO



0 1 m

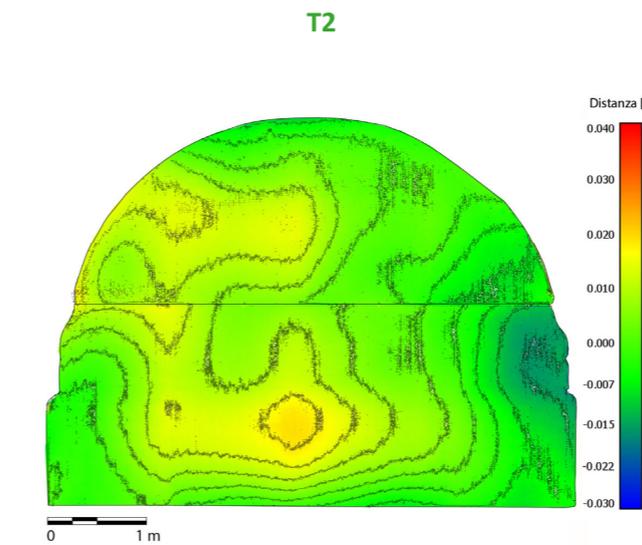
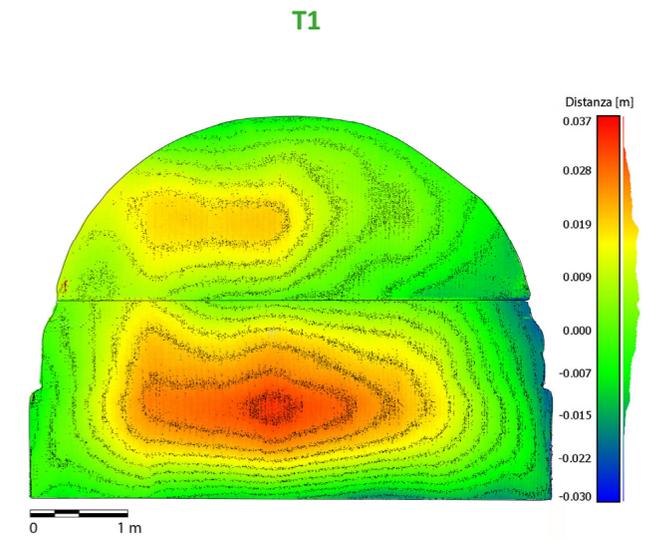
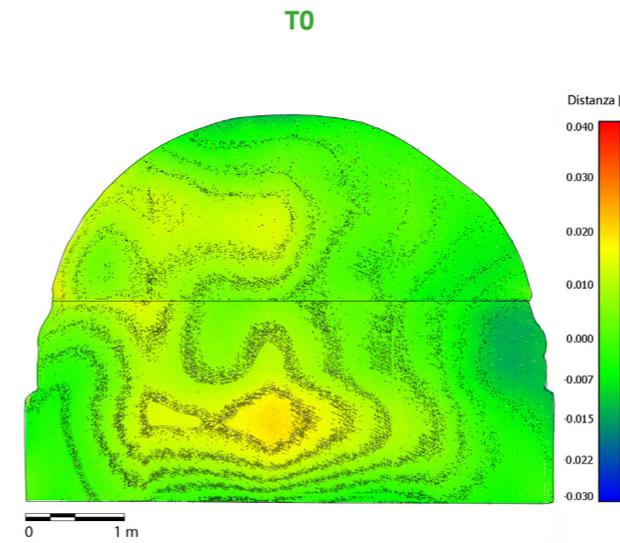
FOTOPIANO



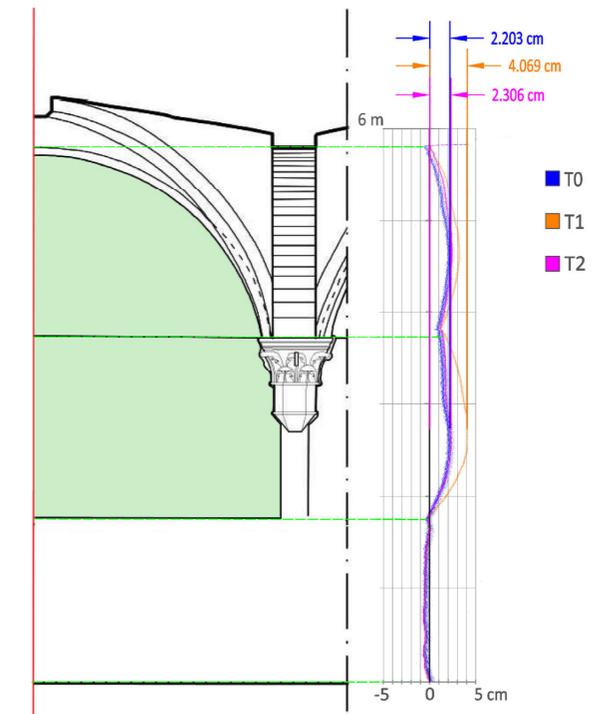
0 1 m

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



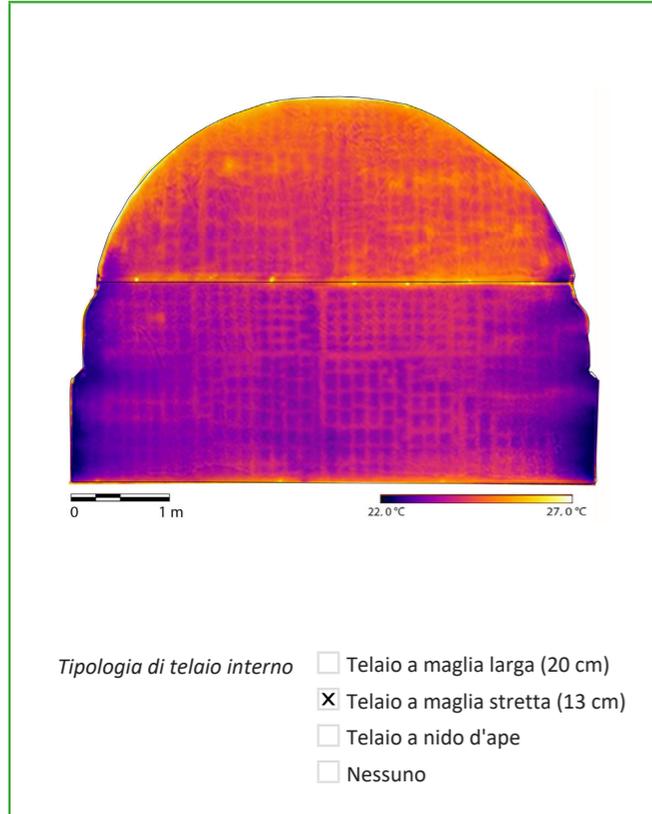
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimonto viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½
- 13 - 11½
- 11 - 9½
- 9 - 7½
- 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore Giacobbe edificato un altare vicino a Salem, prega il Signore

Nome registro inferiore I figli di Giacobbe vendicano la sorella

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-
Reg. superiore 0900281148-24

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-
Reg. inferiore 0900281148-25

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Chiostro Verde, lato Ovest, 6° campata

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.00 x 4.89 x 0.015 m Area 7.74 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restaurato supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.04 x 5.36 x 0.015 m Area 10.75 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restaurato supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

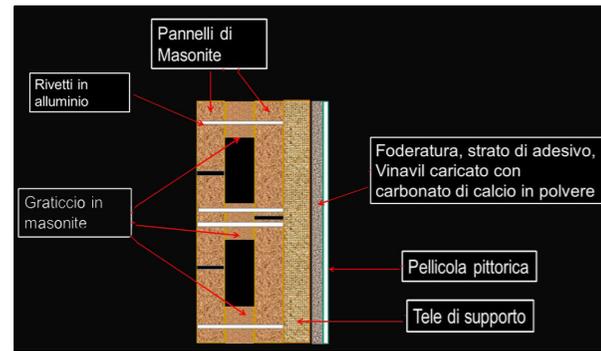
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

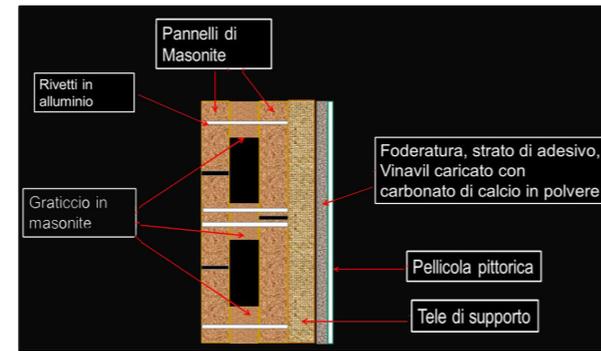
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

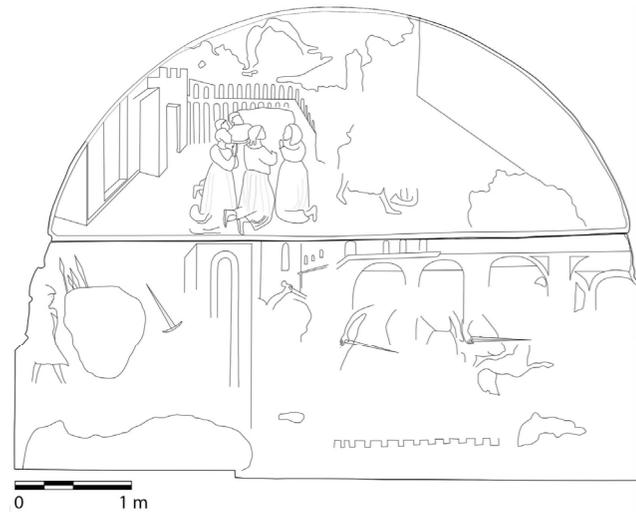
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO

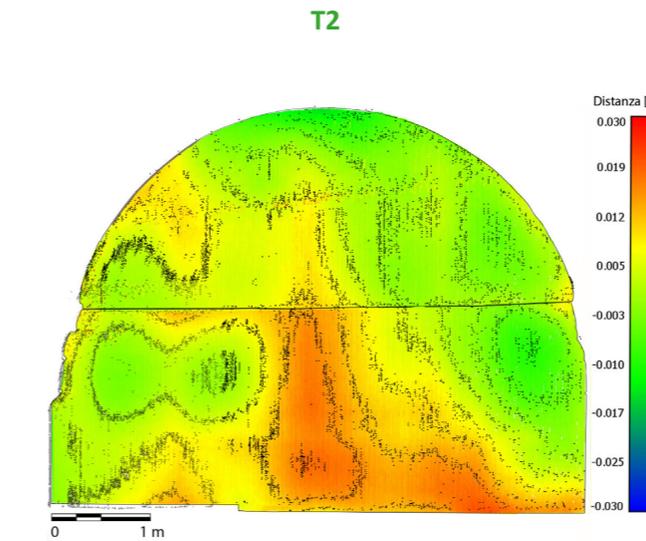
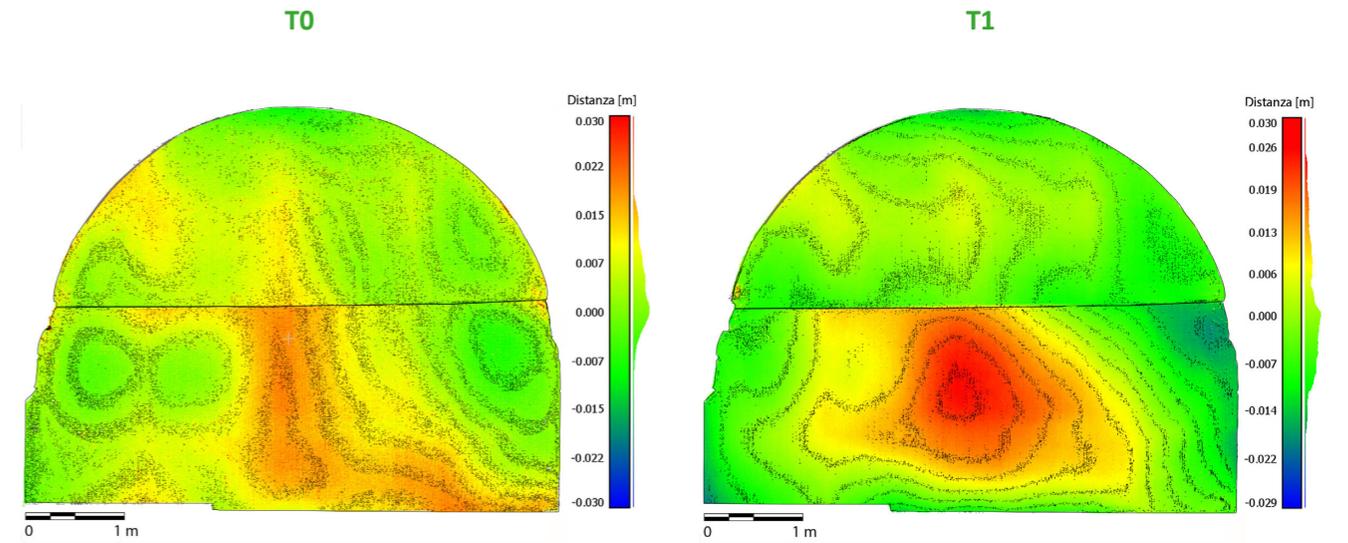


FOTOPIANO

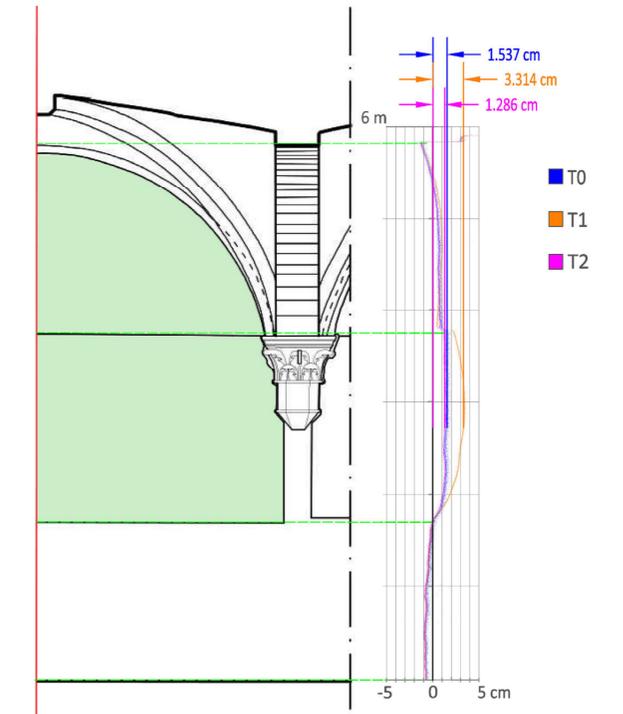


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)



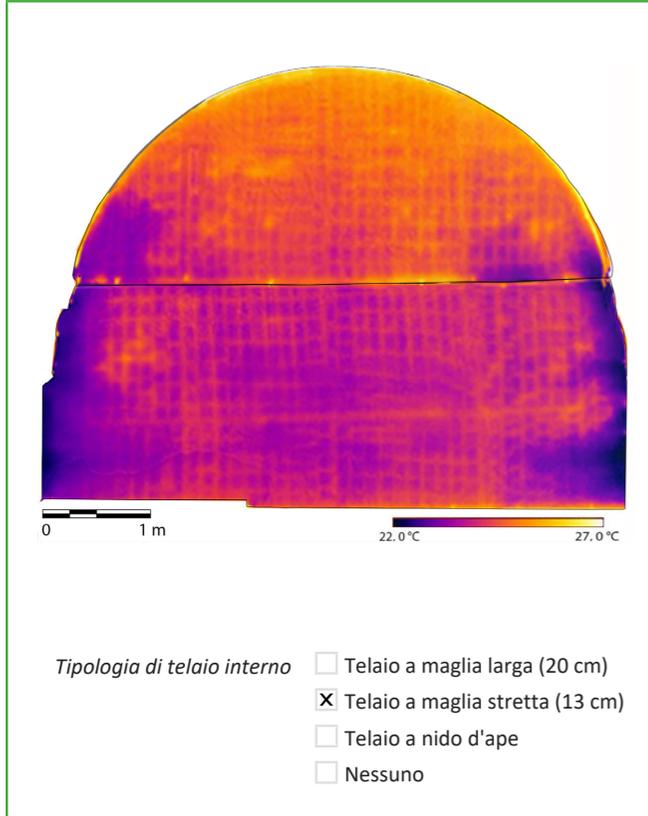
LASER SCANNER (sezioni)



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

Stato di conservazione

- Deformazioni localizzate
- Sconnessioni fuori dal piano
- Pulvirulenza
- Esfoliazioni localizzate
- Efflorescenze localizzate
- Sollevamenti di colore
- Alterazione del colore
- Formazioni di cretti a reticolo
- Disconnessioni telaio interno
- Stuccature e ritocchi
- Decimento viti di ancoraggio
- Variazioni di tonalità/inscurimento
- Attacco microbiologico

Magnitudo di rischio*

- 15 - 13½ 9 - 7½
- 13 - 11½ 7 - 5½
- 11 - 9½

***OSSERVAZIONI**

Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore La creazione degli animali e la creazione di Adamo

Nome registro inferiore Il Paradiso terrestre, la creazione di Eva e il Peccato originale

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281149-1

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281148-2

Autore Paolo Uccello

Anno 1420-1425

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Ex Refettorio

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.09 x 4.46 x 0.01 m Area 7.27 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale Vetrosina (supporto sandwich)
 Masonite tamburata
 Masonite semi-tamburata
 Rete metallica con gesso

Nuovo supporto Uno strato di masonite e aerolam
 Rete metallica e aerolam
 Vetrosina e aerolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.45 x 4.78 x 0.01 m Area 11.54 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

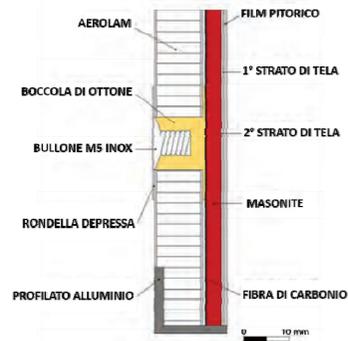
Supporto Originale Vetrosina (supporto sandwich)
 Masonite tamburata
 Masonite semi-tamburata
 Rete metallica con gesso

Nuovo supporto Uno strato di masonite e aerolam
 Rete metallica e aerolam
 Vetrosina e aerolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

Stratigrafia complessiva

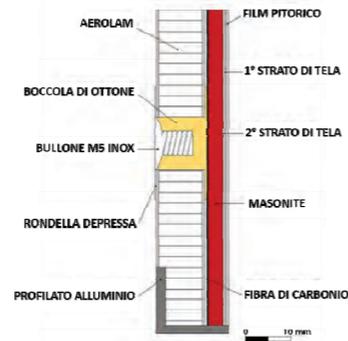


Tipologia di ancoraggio alla muratura

- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
- Rondelle (ø cm 2)
- Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
- Boccola in ottone con bullone M5 inox
- Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

Stratigrafia complessiva

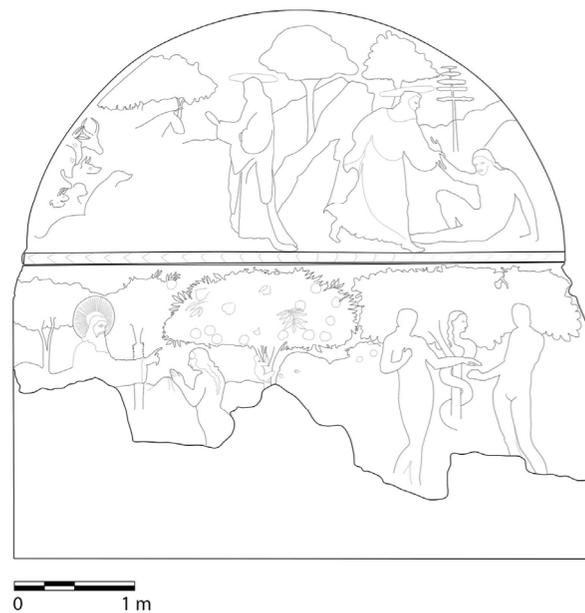


Tipologia di ancoraggio alla muratura

- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
- Rondelle (ø cm 2)
- Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
- Boccola in ottone con bullone M5 inox
- Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO



FOTOPIANO

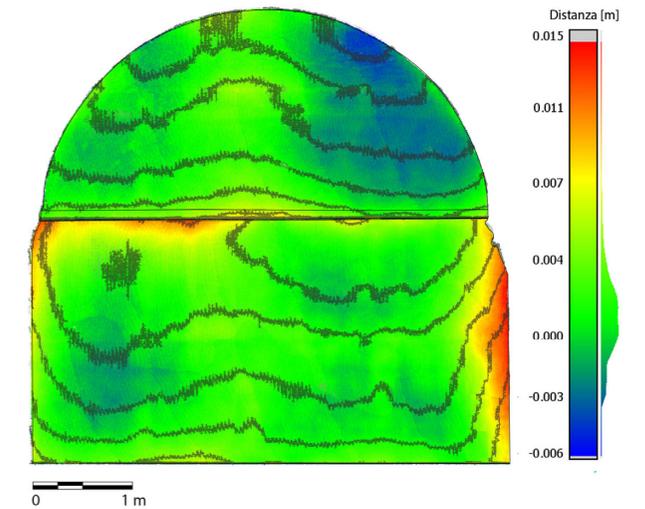


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)

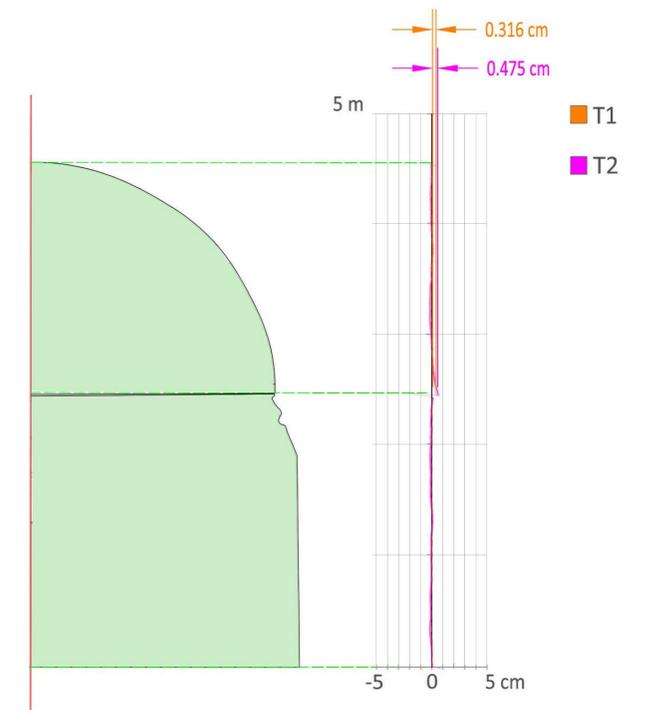
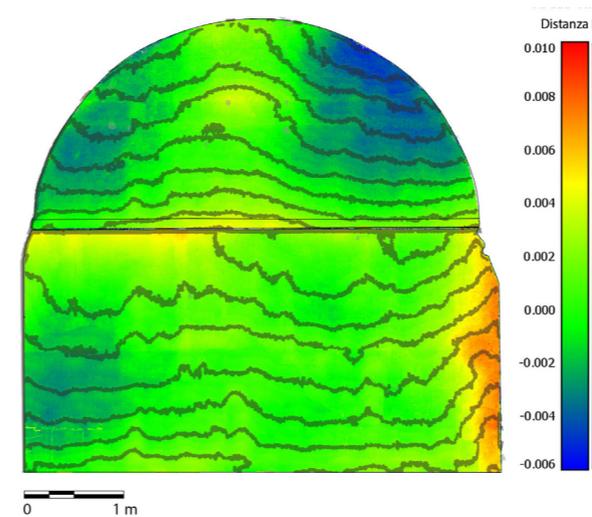
T0

T1



LASER SCANNER (sezioni)

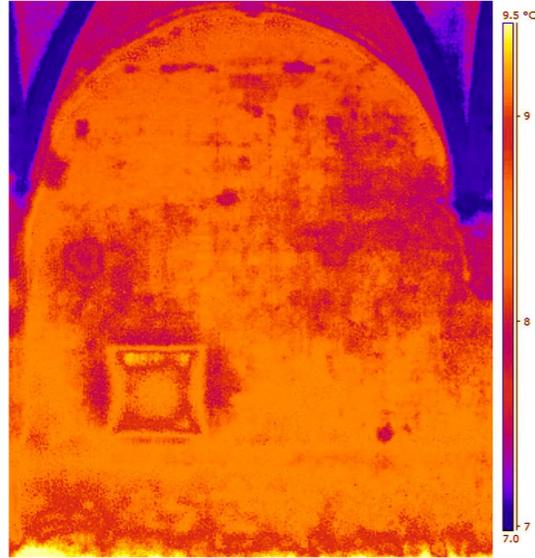
T2



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



- Tipologia di telaio interno
- Telaio a maglia larga (20 cm)
 - Telaio a maglia stretta (13 cm)
 - Telaio a nido d'ape
 - Nessuno

Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No

- Stato di conservazione
- Deformazioni localizzate
 - Sconnessioni fuori dal piano
 - Pulvirulenza
 - Esfoliazioni localizzate
 - Efflorescenze localizzate
 - Sollevamenti di colore
 - Alterazione del colore
 - Formazioni di cretti a reticolo
 - Disconnessioni telaio interno
 - Stuccature e ritocchi
 - Decimento viti di ancoraggio
 - Variazioni di tonalità/inscurimento
 - Attacco microbiologico

- Magnitudo di rischio*
- 15 - 13½
 - 13 - 11½
 - 11 - 9½
 - 9 - 7½
 - 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

- La TERMOGRAFIA IR si riferisce alla sola muratura, in quanto l'affresco in questione è stato staccato e restaurato, con la rimozione del telaio interno del supporto.
- Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. OPD restauro 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore La cacciata dal Paradiso terrestre e il lavoro dei progenitori

Nome registro inferiore Il sacrificio di Caino e Abele; Caino uccide Abele

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-
Reg. superiore 0900281149-3

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)-
Reg. inferiore 0900281149-4

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1430-1440

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Ex Refettorio

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.61 x 4.55 x 0.01 m Area 9.67 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

- Supporto originale
- Vetrosesina (supporto sandwich)
 - Masonite tamburata
 - Masonite semi-tamburata
 - Rete metallica con gesso

- Nuovo supporto
- Uno strato di masonite e aerolam
 - Rete metallica e aerolam
 - Vetrosesina e aerolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 1.90 x 4.62 x 0.01 m Area 8.64 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

- Supporto Originale
- Vetrosesina (supporto sandwich)
 - Masonite tamburata
 - Masonite semi-tamburata
 - Rete metallica con gesso

- Nuovo supporto
- Uno strato di masonite e aerolam
 - Rete metallica e aerolam
 - Vetrosesina e aerolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

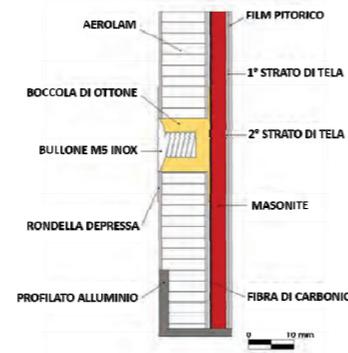
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO



FOTOPIANO

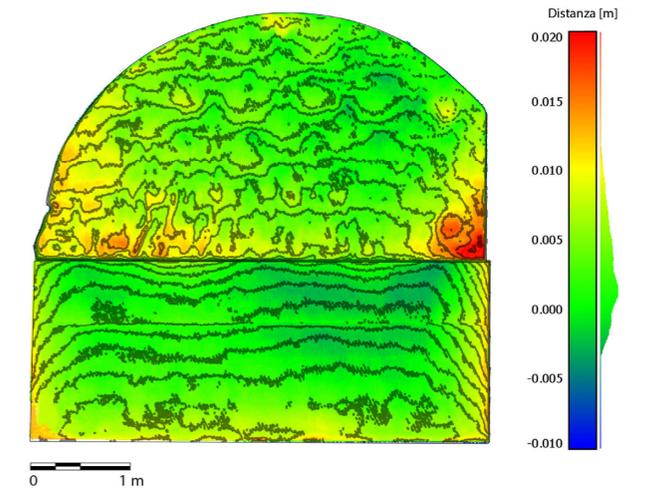


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)

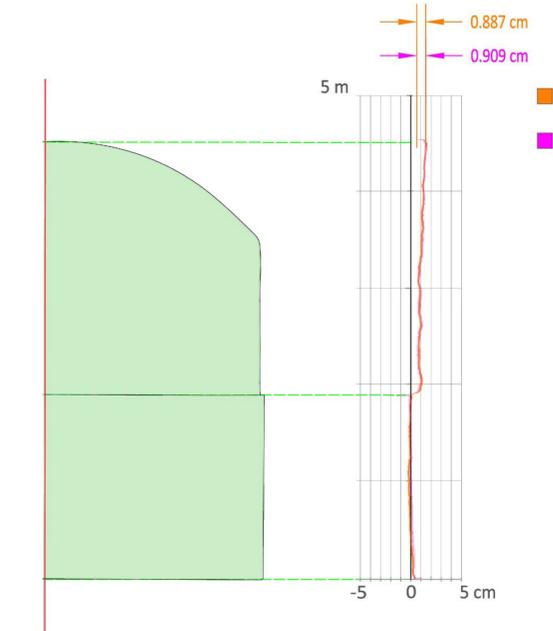
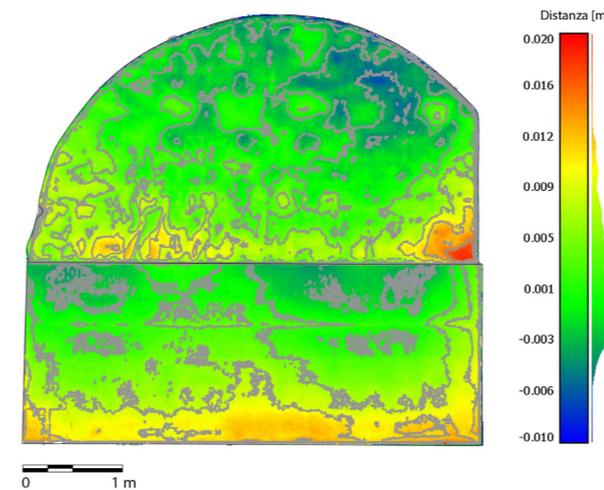
T0

T1



LASER SCANNER (sezioni)

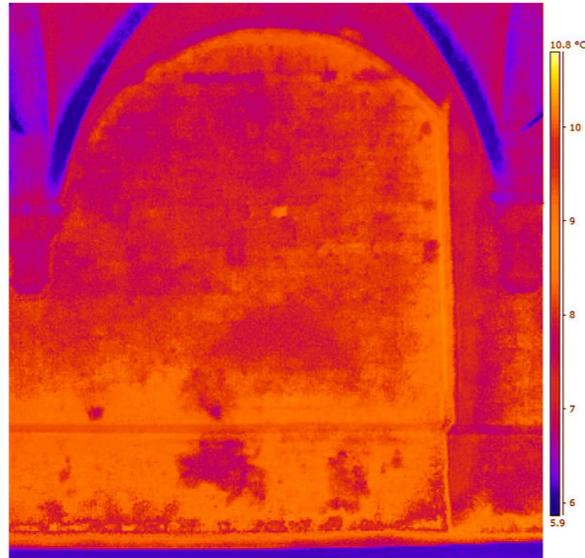
T2



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



- Tipologia di telaio interno
- Telaio a maglia larga (20 cm)
 - Telaio a maglia stretta (13 cm)
 - Telaio a nido d'ape
 - Nessuno

- Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No
- Stato di conservazione
- Deformazioni localizzate
 - Sconnessioni fuori dal piano
 - Pulvirulenza
 - Esfoliazioni localizzate
 - Efflorescenze localizzate
 - Sollevamenti di colore
 - Alterazione del colore
 - Formazioni di cretti a reticolo
 - Disconnessioni telaio interno
 - Stuccature e ritocchi
 - Decimento viti di ancoraggio
 - Variazioni di tonalità/inscurimento
 - Attacco microbiologico

- Magnitudo di rischio*
- 15 - 13½
 - 13 - 11½
 - 11 - 9½
 - 9 - 7½
 - 7 - 5½

***OSSERVAZIONI**

- La TERMOGRAFIA IR si riferisce alla sola muratura, in quanto l'affresco in questione è stato staccato e restaurato, con la rimozione del telaio interno del supporto.
- Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. OPD restauro 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia

Nome registro inferiore L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281149-5

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281149-6

Autore Ignoto pittore fiorentino

Anno 1425-1449

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Ex Refettorio

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.21 x 4.79 x 0.01 m Area 8.50 m²

- Restauri documentati
- 1851: G. Bianchi restaura
 - 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
 - 1930-1943: A. Benini restaura
 - 1942: ICR strappa l'affresco
 - 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
 - 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
 - 2007: A. Vigna restaura
 - 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

- Supporto originale
- Vetroresina (supporto sandwich)
 - Masonite tamburata
 - Masonite semi-tamburata
 - Rete metallica con gesso

- Nuovo supporto
- Uno strato di masonite e aerolam
 - Rete metallica e aerolam
 - Vetroresina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.47 x 5.07 x 0.01 m Area 11.88 m²

- Restauri documentati
- 1851: G. Bianchi restaura
 - 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
 - 1930-1943: A. Benini restaura
 - 1942: ICR strappa l'affresco
 - 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
 - 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
 - 2007: A. Vigna restaura
 - 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

- Supporto Originale
- Vetroresina (supporto sandwich)
 - Masonite tamburata
 - Masonite semi-tamburata
 - Rete metallica con gesso

- Nuovo supporto
- Uno strato di masonite e aerolam
 - Rete metallica e aerolam
 - Vetroresina e areolam

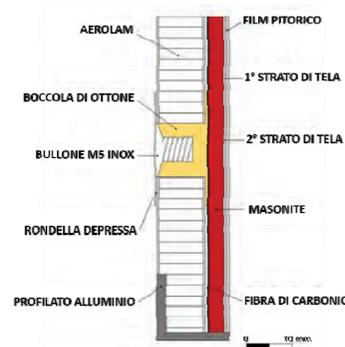
SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA



A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

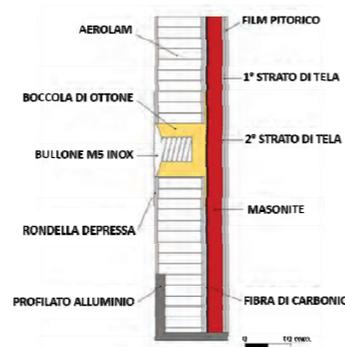
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

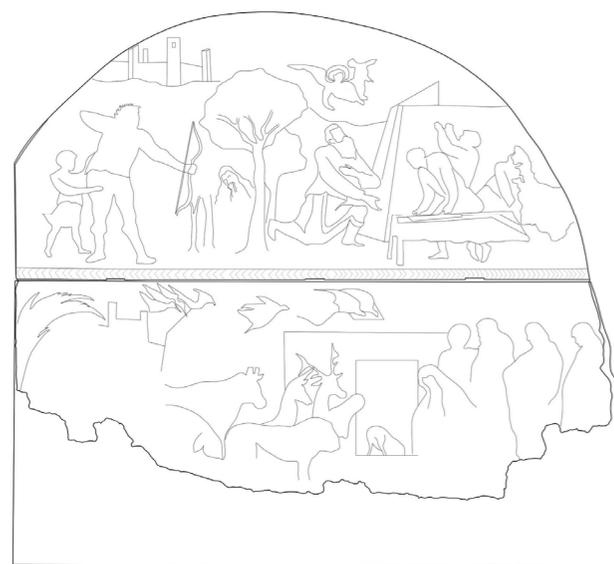
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO



FOTOPIANO



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

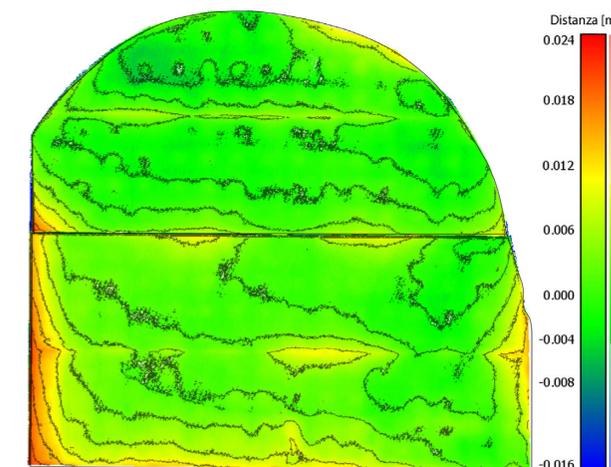


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)

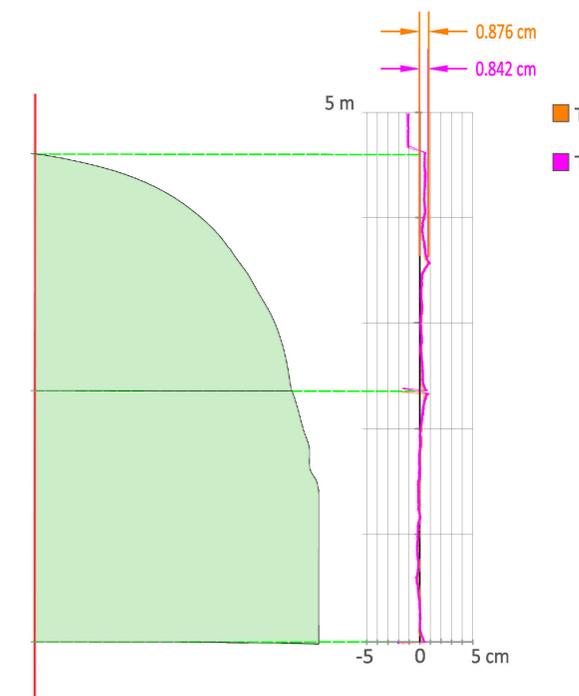
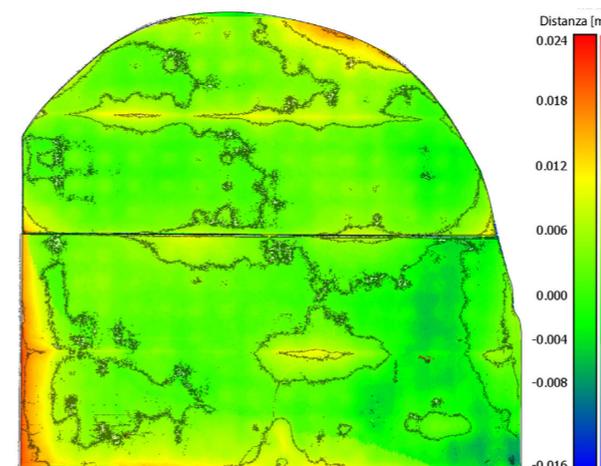
T0

T1



LASER SCANNER (sezioni)

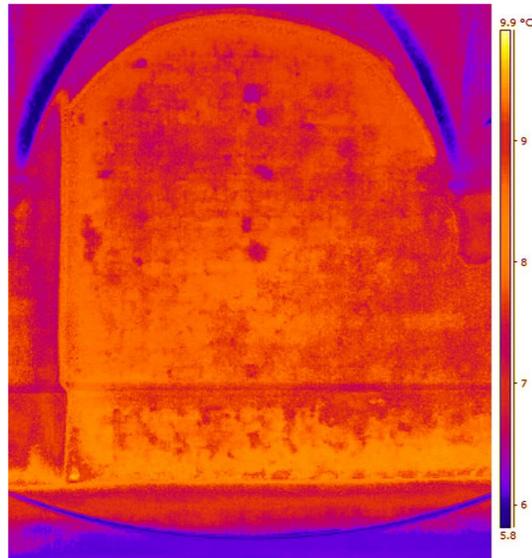
T2



SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



- Tipologia di telaio interno
- Telaio a maglia larga (20 cm)
 - Telaio a maglia stretta (13 cm)
 - Telaio a nido d'ape
 - Nessuno

- Congruenza con schedatura esistente (2021) Si No
- Stato di conservazione
- Deformazioni localizzate
 - Sconnessioni fuori dal piano
 - Pulvirulenza
 - Esfoliazioni localizzate
 - Efflorescenze localizzate
 - Sollevamenti di colore
 - Alterazione del colore
 - Formazioni di cretti a reticolo
 - Disconnessioni telaio interno
 - Stuccature e ritocchi
 - Decimento viti di ancoraggio
 - Variazioni di tonalità/inscurimento
 - Attacco microbiologico

- Magnitudo di rischio*
- 15 - 13½
 - 13 - 11½
 - 7 - 5½
 - 9 - 7½
 - 11 - 9%

***OSSERVAZIONI**

- La TERMOGRAFIA IR si riferisce alla sola muratura, in quanto l'affresco in questione è stato staccato e restaurato, con la rimozione del telaio interno del supporto.
- Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure di questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviate in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente, da rischio di priorità trascurabile, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. OPD restauro 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

SCHEDATURA PER IL CENSIMENTO DEGLI AFFRESCHI STRAPPATI/STACCATI DEL
CHIOSTRO VERDE NELLA BASILICA DI SANTA MARIA NOVELLA

A- DATI GENERALI Operatore Sofia Brizzi Data 11/11/2023

Nome registro superiore Il Diluvio universale e la recessione delle acque

Nome registro inferiore L'uscita dall'arca; Il sacrificio di Noè; la benedizione e il fatto divino; la vigna e l'ebbrezza di Noè

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. superiore 0900281149-7

Codice di catalogo Nazionale (ICCD)- Reg. inferiore 0900281149-8

Autore Paolo Uccello

Anno 1436-1440

Ente competente per la tutela SABAP per la città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato



LOCALIZZAZIONE

Nazione Italia

Regione NUTS2 Toscana

Città Firenze

Complesso architettonico Basilica di Santa Maria Novella

Area Ex Refettorio

REGISTRO SUPERIORE

Dimensioni 2.15 x 5.05 x 0.01 m Area 8.37 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

REGISTRO INFERIORE

Dimensioni 2.40 x 5.41 x 0.01 m Area 13.21 m²

Restauri documentati

- 1851: G. Bianchi restaura
- 1907: D. Fiscali stacca l'affresco
- 1930-1943: A. Benini restaura
- 1942: ICR strappa l'affresco
- 1952-1954: L. Tintori strappa e inserisce supporto
- 1967-1970: L. Tintori, A. del Serra, G. Rosi restaurano
- 2007: A. Vigna restaura
- 2014: OPD restaura e modifica supporto

Restauro supporto Si (2014, OPD) No

Supporto Originale

- Vetrosesina (supporto sandwich)
- Masonite tamburata
- Masonite semi-tamburata
- Rete metallica con gesso

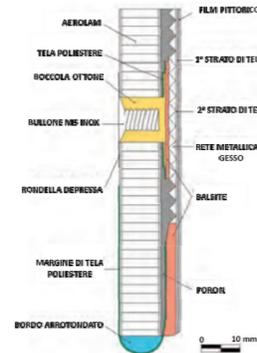
Nuovo supporto

- Uno strato di masonite e aerolam
- Rete metallica e aerolam
- Vetrosesina e areolam

A- DATI GENERALI

REGISTRO SUPERIORE

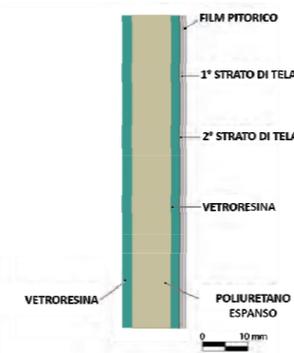
Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

REGISTRO INFERIORE

Stratigrafia complessiva



- Tipologia di ancoraggio alla muratura
- Viti di ottone (ø testa cm 1.1)
 - Rondelle (ø cm 2)
 - Barre di metallo (sezione cm 1 x 0.8)
 - Boccola in ottone con bullone M5 inox
 - Barra in lega di alluminio (mm 15x15)

B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

FIL DI FERRO



FOTOPIANO

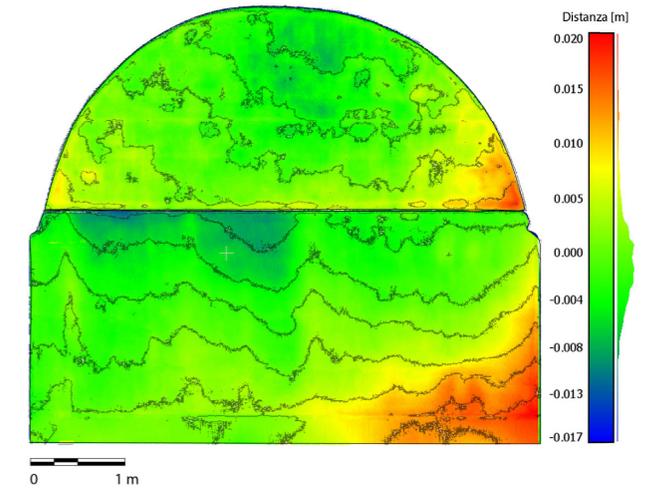


B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

LASER SCANNER (DEM)

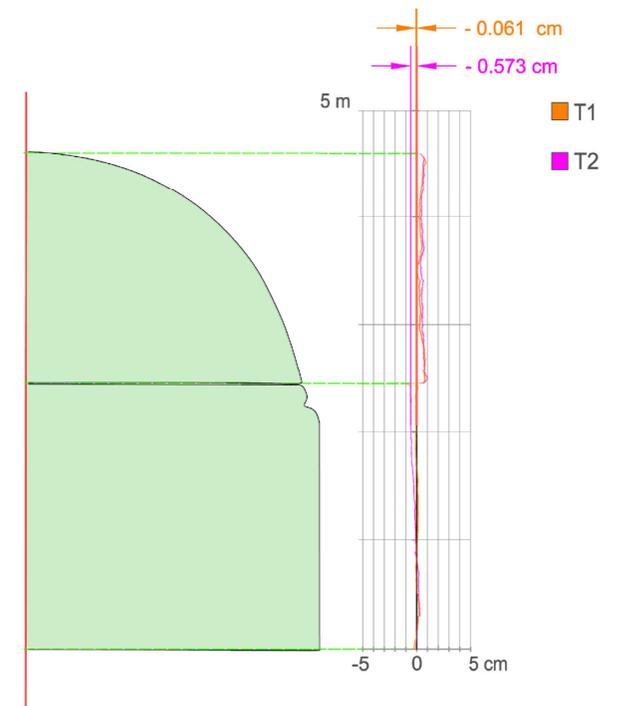
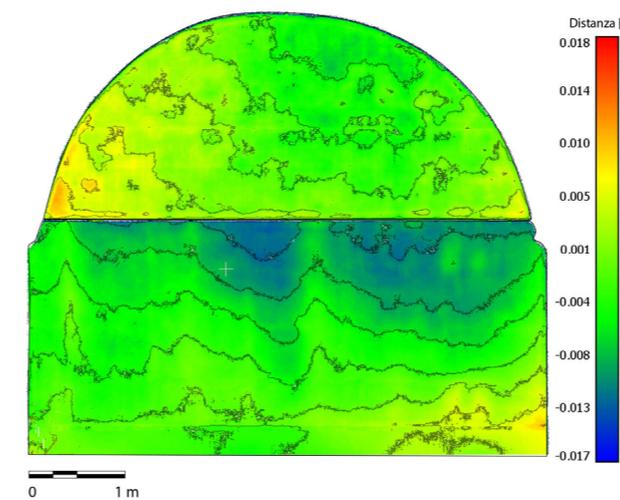
T0

T1



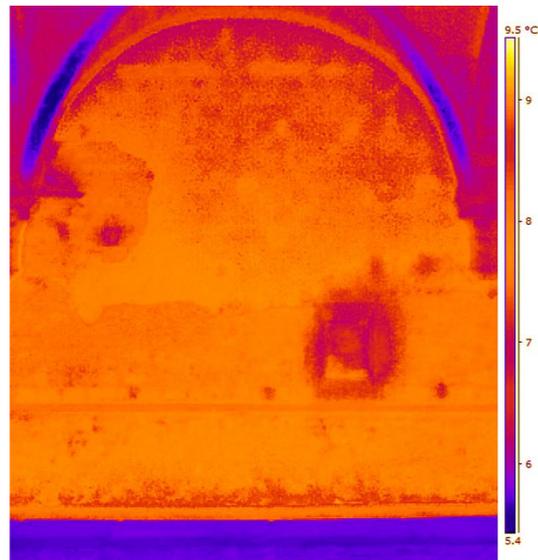
LASER SCANNER (sezioni)

T2



B- RISULTATI DEL PROTOCOLLO METODOLOGICO

TERMOGRAFIA IR



- Tipologia di telaio interno
- Telaio a maglia larga (20 cm)
 - Telaio a maglia stretta (13 cm)
 - Telaio a nido d'ape
 - Nessuno

Congruenza con schedatura esistente (2021) Sì No

- Stato di conservazione
- Deformazioni localizzate
 - Sconnessioni fuori dal piano
 - Pulvirulenza
 - Esfoliazioni localizzate
 - Efflorescenze localizzate
 - Sollevamenti di colore
 - Alterazione del colore
 - Formazioni di cretti a reticolo
 - Disconnessioni telaio interno
 - Stuccature e ritocchi
 - Decimento viti di ancoraggio
 - Variazioni di tonalità/inscurimento
 - Attacco microbiologico

- Magnitudo di rischio*
- 15 - 13½
 - 13 - 11½
 - 11 - 9½
 - 9 - 7½
 - 7 - 5½

*OSSERVAZIONI

- La TERMOGRAFIA IR si riferisce alla sola muratura, in quanto l'affresco in questione è stato staccato e restaurato, con la rimozione del telaio interno del supporto.
- Nel manuale ABC dell' ICCROM, il rischio è espresso su una scala logaritmica a 15 punti e le misure su questa scala sono chiamate "magnitudo del rischio", abbreviata in MR. Partendo dai valori MR 7- 5½ fino ai 15- 13½ si passa, rispettivamente da rischio di trascurabile priorità, media, alta, estrema e catastrofica.

BIBLIOGRAFIA

- Risk Manual (2016), ABC Method, ICCROM.
- Frosinini, C. (2021). Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde. Edifir.
- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna (2007). Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro. *OPD restauro* 19: 13-48.
- <https://www.catalogo.beniculturali.it>, ICCD.

5.4 Discussione delle metodologie e dei risultati

I dati raccolti nelle 16 schede possono essere utilizzati con varie finalità. Come sostenuto nel paragrafo 2.3, uno dei principali vantaggi della catalogazione degli affreschi è la possibilità di esportare i dati contenuti nei vari campi delle schede in formato .csv, contenente tutte le informazioni raccolte per ciascun affresco, espresse come stringhe di testo, o valori separati da virgole. In tale ambito è stato deciso di non importare i dati nel software QGIS, tuttavia questa applicazione potrà essere presa in considerazione in futuro, soprattutto se il processo di catalogazione di affreschi staccati/strappati si estenderà ad altri casi di studio aventi coordinate geografiche differenti (ad esempio altri chiostrini in ambito fiorentino) e la possibilità di avere un repository spaziale e temporale di dati consultabili open source potrà risultare di fondamentale importanza.

La possibilità sfruttata in tale elaborato di tesi è stata quella di esportare i dati in vari formati, sia sotto forma di scheda grafica in formato .PDF – utili per la consultazione e per l'archiviazione delle informazioni – sia sotto forma di

tabelle, nelle estensioni .XML, .XLSX e .CSV. Attraverso la predisposizione di un file di export è possibile selezionare e ordinare i campi da esportare in base alle esigenze. Nel caso del chiostro Verde i dati sono stati elaborati con tale finalità; ad esempio il campo relativo allo stato di conservazione ha permesso di creare delle distribuzioni percentuali delle maggiori sorgenti di degrado rilevate sui dipinti del chiostro (Fig. 5.13). In particolare si nota che i rischi predominanti risiedono nelle deformazioni localizzate, sconnessione fuori dal piano, stuccature e ritocchi e il cedimento del sistema di ancoraggio, ovvero tutti fenomeni strettamente connessi tra di loro.

Per quanto riguarda l'osservazione dei risultati del protocollo metodologico proposto in questo elaborato di tesi, si osserva che gli affreschi conservati nel lato Ovest del chiostro mostrano, in via generale, uno stato di degrado più avanzato rispetto a quelli del lato Sud. I problemi legati alla condensa del vapore acqueo, le trasformazioni che il lato ha subito nel corso della storia (diversi elementi architettonici furono tamponati: una porta di accesso sotto la muratura della prima campata a partire da sinistra – si veda termogramma di Fig.

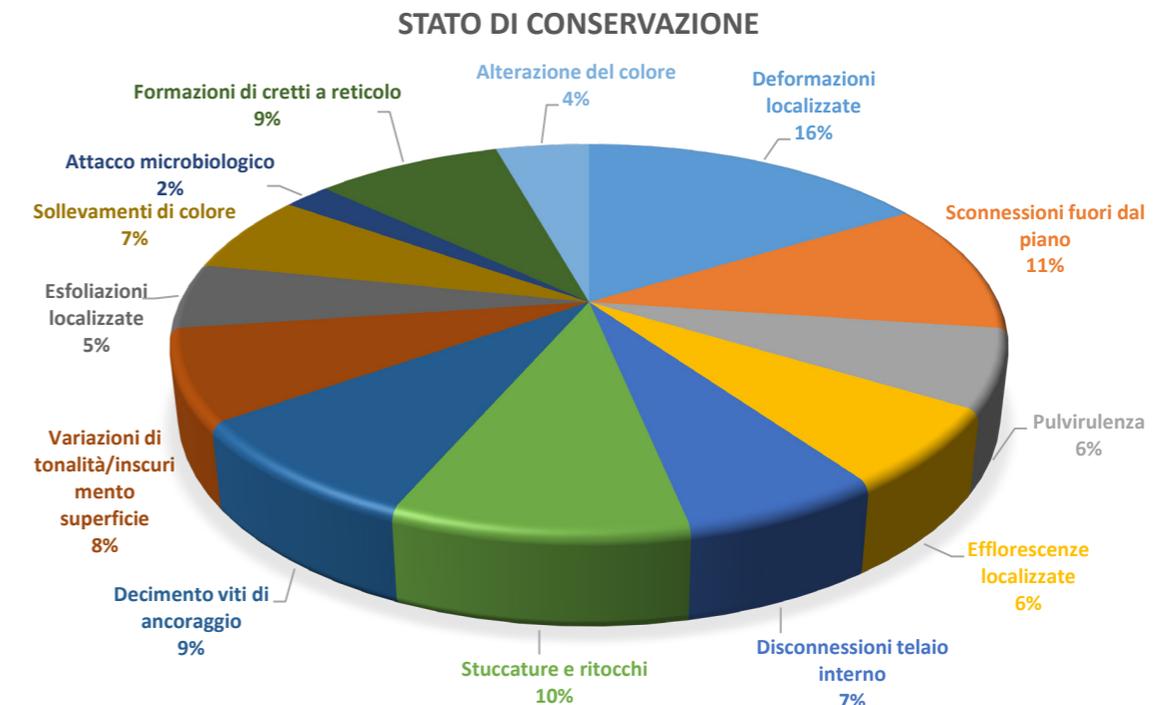


Fig. 5.13 grafico relativo ai dati circa lo stato di conservazione degli affreschi del chiostro Verde (lato Ovest e Sud) esportati dalle schede di catalogazione.

5.14- dove è visibile la tamponatura, come anche l'antica presenza di un camino localizzato a metà del lato Ovest), possono aver contribuito alla loro precaria conservazione. In alcuni casi, come per gli affreschi nel lato Ovest delle campate 3, 4 e 5 da sinistra, le deformazioni e le sconnessioni fuori dal piano arrivano fino ad un massimo di 4.5 cm rispetto al piano che interpola e fitta il maggior numero di punti appartenenti alla superficie dell'intero dipinto murale (considerando tuttavia sempre i possibili errori di allineamento e quelli strumentali).

Inoltre nelle stesse campate si nota il cedimento dei tasselli di ancoraggio che hanno così permesso alla Masonite di muoversi e deformarsi con maggiore libertà. Dall'osservazione dei DEM si evince infatti che le zone maggiormente deformate sono quelle dove la vite di fissaggio è venuta meno e dove si collocano le giunture tra i diversi pannelli costituenti i supporti. Quest'ultima affermazione trova riscontro dalla sovrapposizione degli orto-mosaici IR con le curve di livello,

dove si osserva come i maggiori cambiamenti strutturali siano localizzati proprio all'interfaccia tra i singoli pannelli di Masonite e del telaio interno della masonite tamburata (un esempio è mostrato in Fig. 5.15).

I maggiori imbarcamenti sono stati rilevati a Marzo 2022 (T1), ovvero il periodo invernale, durante il quale il supporto si contrae, aumenta la freccia d'imbarcamento nella parte centrale e si riduce ai margini. Le deformazioni minori sono invece state riscontrate nel Luglio 2021 (T0), infatti durante il periodo estivo il supporto si dilata, mantenendo una certa planarità. Stesso fenomeno è stato rilevato nella stagione autunnale (Ottobre 2022, T2) in cui i supporti, dati i parametri termo-igrometrici più miti, sembrano ritornare ad uno stato di maggiore planarità. Questi movimenti sono quindi fisiologici, dovuti alle condizioni ambientali in cui i supporti sono conservati: notiamo infatti che le deformazioni subite dai dipinti murali musealizzati internamente, benché l'ambiente non sia dotato di impianti di calore/raffreddamento utili a

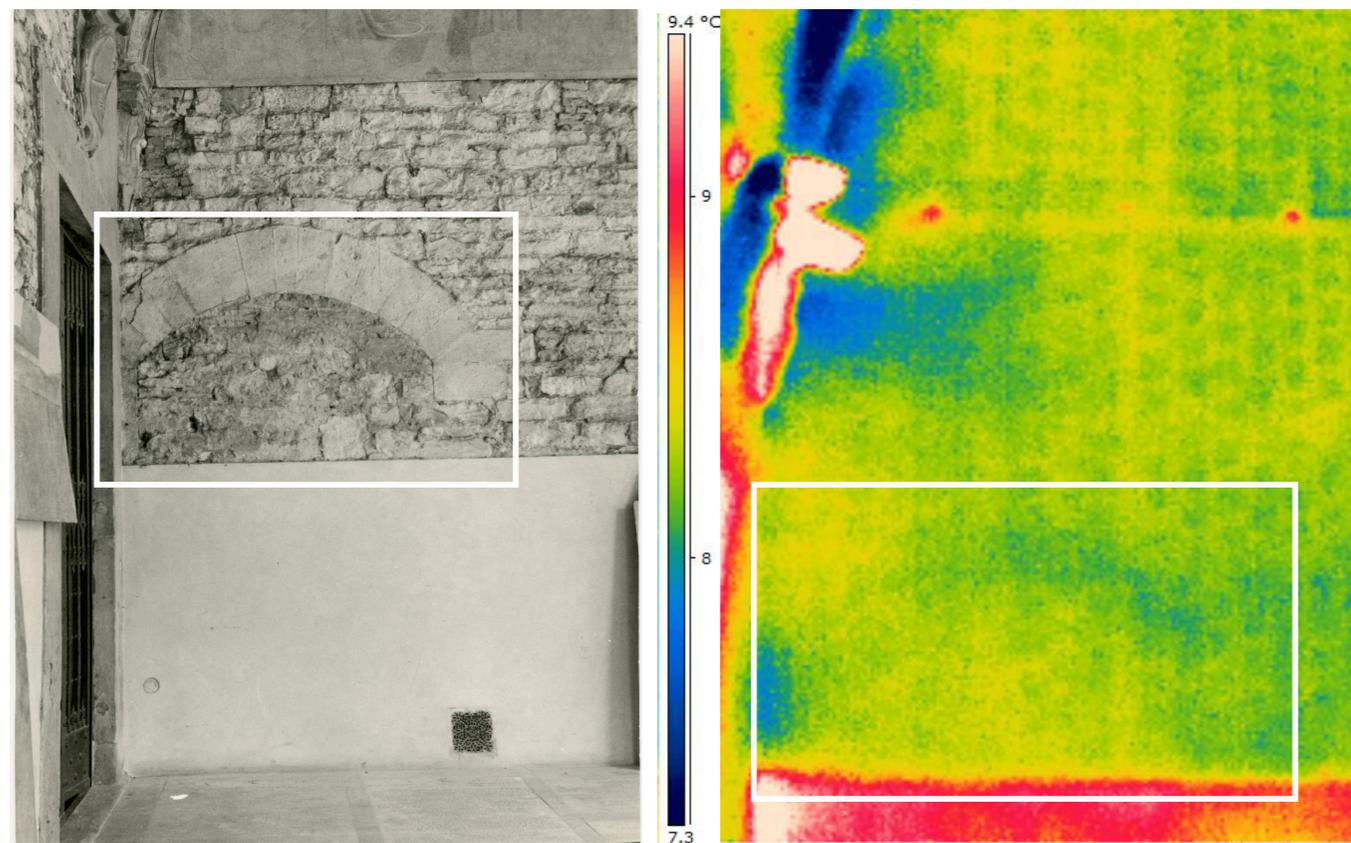


Fig. 5.14 a sinistra: foto storica con visibile l'antica apertura presente nell'angolo tra il braccio occidentale e quello meridionale del chiostro Verde (in Frassinini, 2021). A destra: termogramma IR con visibile l'arco tamponato.

evitare importanti escursioni termiche, sono molto ridotte rispetto a quelle che subiscono gli affreschi conservati in esterno. Inoltre, grazie alla possibilità di identificazione della struttura interna della masonite, resa possibile grazie al rilievo termografico IR, sono stati riscontrati tre diverse tipologie di telaio interno:

- Supporti in Masonite tamburata con telaio interno a maglia stretta (13 cm);
- Supporti in Masonite tamburata con telaio interno a maglia larga (20 cm);
- Supporti in Masonite tamburata con telaio a nido d'ape.

La loro distribuzione in planimetria viene fornita in Fig. 5.16. In particolare, come si evince dalle schede di catalogazione, si nota che per i dipinti murali della seconda campata da sinistra nel lato Sud del chiostro (ovvero quella che presenta un telaio con graticcio interno a maglia larga) le deformazioni sono maggiori rispetto agli altri affreschi dello stesso lato. Per il telaio a nido d'ape non si rilevano invece differenze sostanziali rispetto agli altri affreschi del lato Ovest. Occorre tuttavia tenere in considerazione che tali deformazioni sono ascrivibili a più fattori; nel caso della struttura dei telai interni una notevole importanza è rivestita anche dalla loro integrità: nel lato Ovest, ad esempio, sono molte le disconnessioni e le mancanze di giuntura dei telai interni (se ne vede un esempio nel termogramma di Fig. 5.17). Tali mancati collegamenti

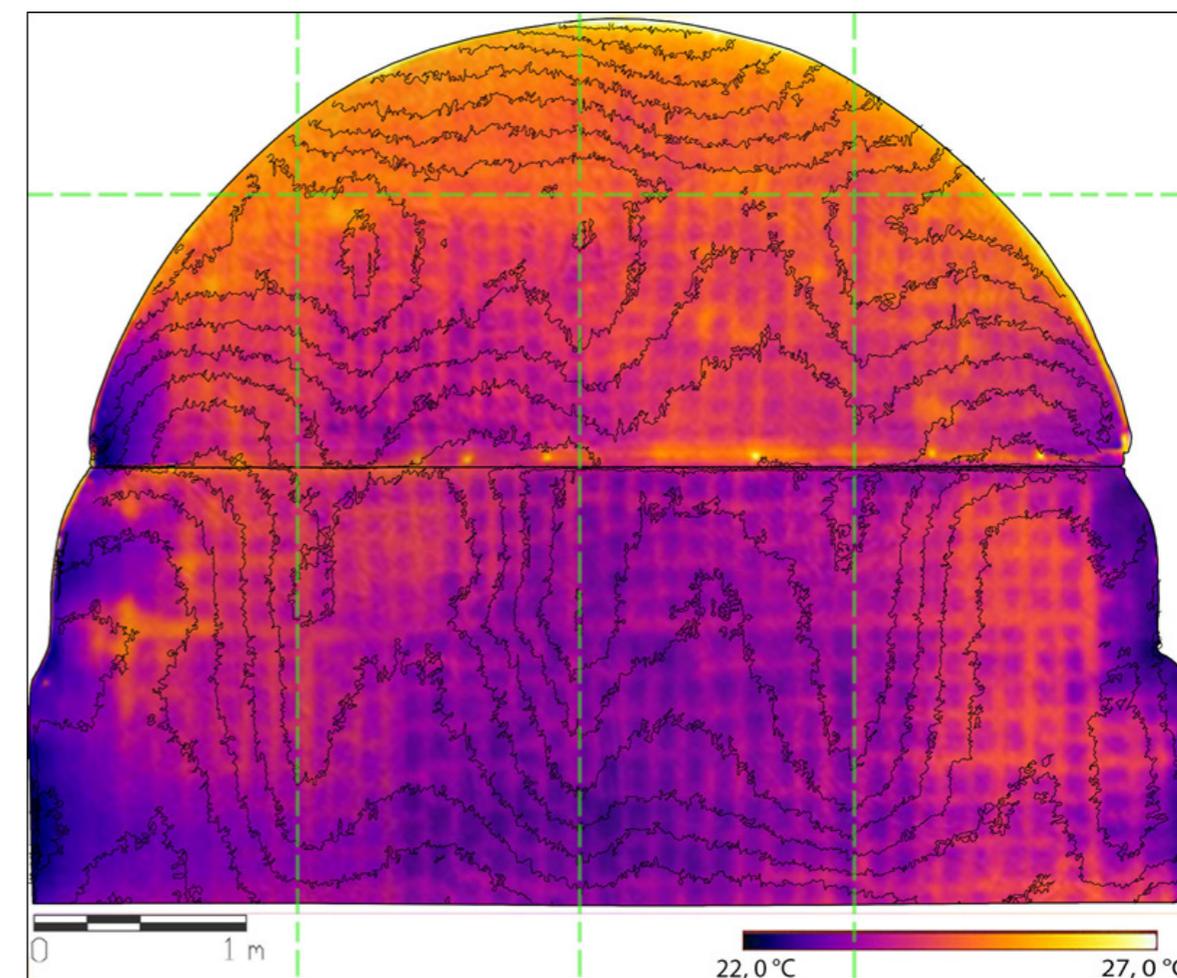


Fig. 5.15 ortomosaico IR e curve di livello (intersitanza 3 mm) dell'affresco "Giacobbe in fuga verso Canaan con la famiglia e le greggi" (4 campata da sinistra, lato Ovest), si evidenziano in verde le linee di giunzione di alcuni pannelli di Masonite del supporto, dove sono localizzate le maggiori deformazioni.

rappresentano sicuramente punti critici per la corretta conservazione dei dipinti.

Per quanto concerne le deformazioni dei diversi supporti degli affreschi musealizzati, quelli che sembrano subire maggiori movimenti sono quelli formati da pannelli in Masonite, seguiti dalla rete metallica e infine dalla vetroresina. Questo fenomeno, come precedentemente affermato, è dato dalla composizione stessa dei supporti in Masonite: essendo essi costituiti da più pannelli, i cambiamenti strutturali risultano localizzati soprattutto nei margini dei singoli pannelli componenti il supporto e all'interfaccia tra questi. Dalla rappresentazione tramite DEM è infatti possibile valutare non solo le deformazioni ma anche la composizione terga del supporto (se ne vede un esempio dei DEM realizzati per l'affresco musealizzato "L'ingresso nell'arca degli animali e

di Noè con la famiglia", Fig. 5.18).

Per quantificare con maggior precisione l'ordine di grandezza delle deformazioni subite dai dipinti murali tra i diversi monitoraggi è possibile inoltre effettuare la comparazione delle nuvole di punti 3D, in questo caso tramite il software *Cloud Compare* (plugin "compute cloud/cloud distance -C2C") che permette di caricare le nuvole ai tempi di interesse e confrontare le distanze (in m) tra gli intervalli di tempo (Costa 2019). In questo caso vengono mostrati i risultati ottenuti sugli affreschi musealizzati "L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia" e "L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia", per i quali sono state determinate le distanze relative ai due intervalli di tempo T2 e T1 lungo l'asse y, ovvero quello rivolto verso l'osservatore. Nella rappresentazione delle nuvole finali di Fig. 5.19, l'intervallo

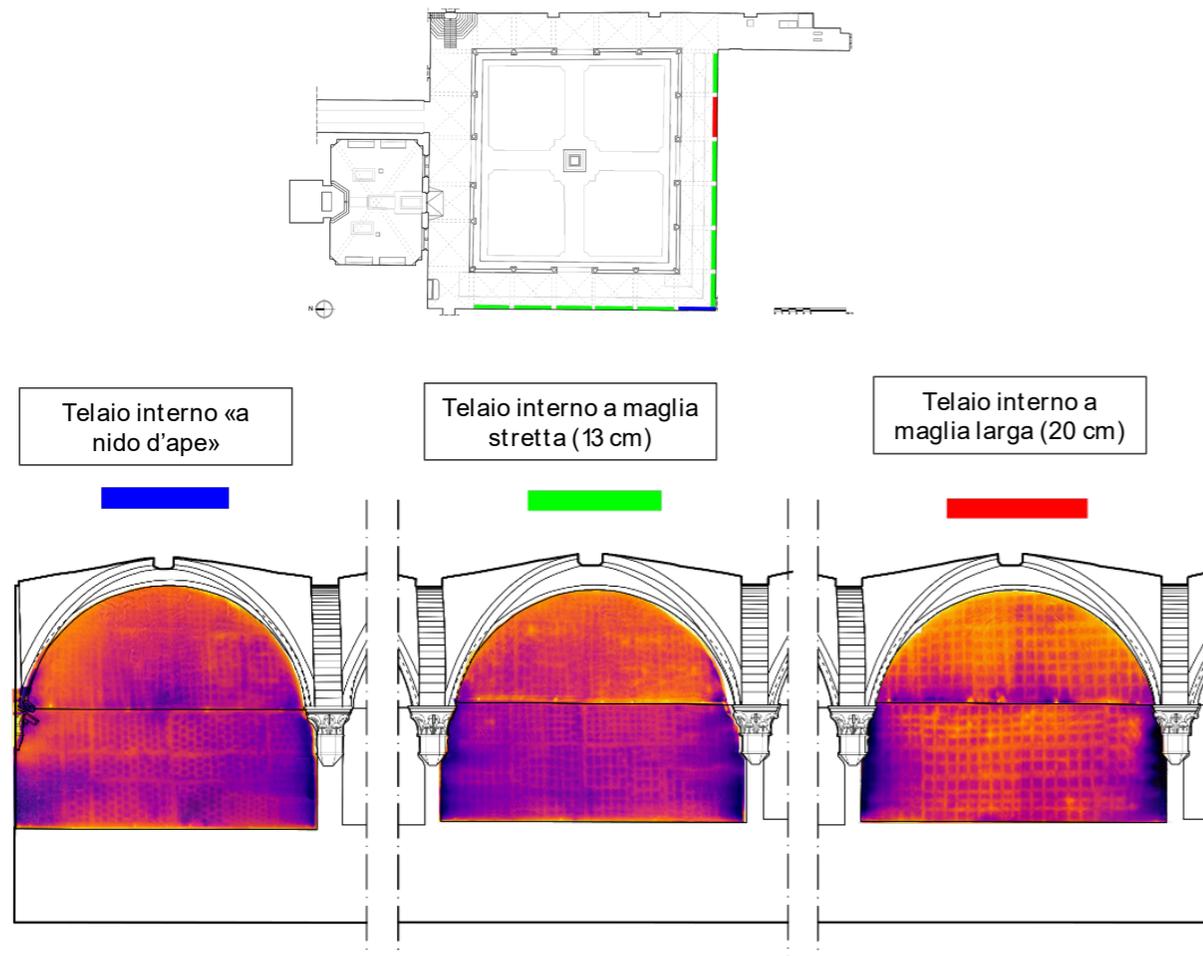


Fig. 5.16 le diverse tipologie di telaio interno presenti nel chiostro Verde di Santa Maria Novella, identificate tramite termografia IR.

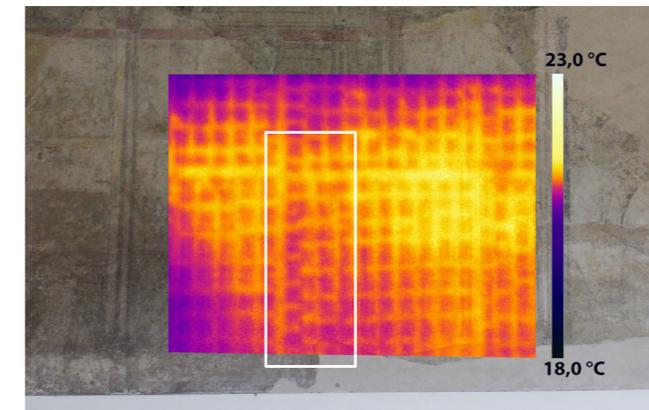


Fig. 5.17 termogramma con evidenziato in bianco un mancato collegamento tra pannelli del reticolo interno sulla parte inferiore dell'affresco "Banchetto per le nozze di Giacobbe", nel lato Ovest del Chiostro verde.

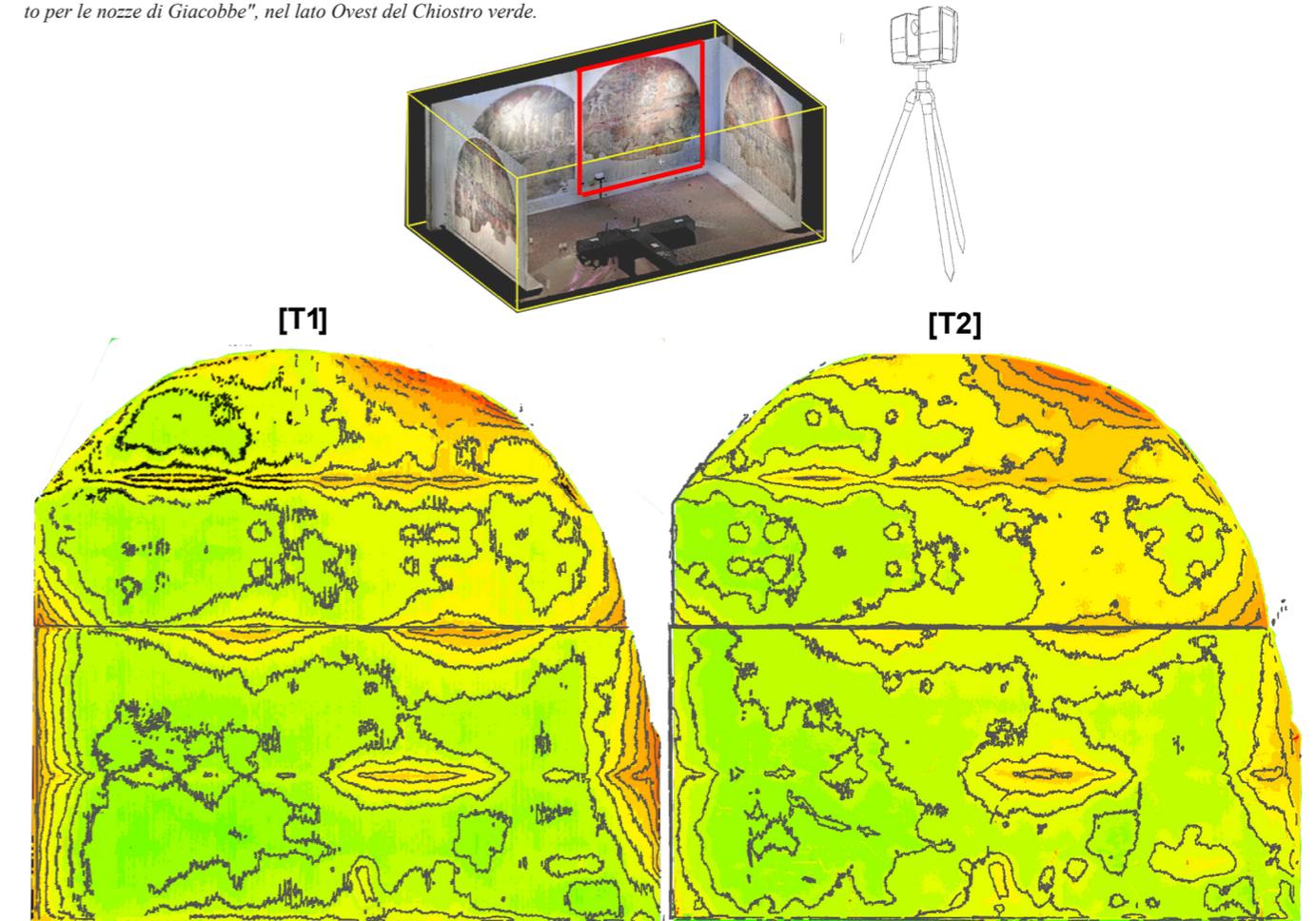


Fig. 5.18 DEM ottenuti da rilievo laser scanner su affresco "L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia" e "L'ingresso nell'arca degli animali e di Noè con la famiglia", con evidenziati in violetto i singoli pannelli costituenti il supporto in Masonite e le aree con le maggiori deformazioni (zone di colore rosso) rilevati ai margini e all'interfaccia di essi.

T2 e T₁ è molto limitata, inferiore al 15%.

Gli affreschi realizzati da Paolo Uccello presentano dunque deformazioni minime, che corrispondono nel peggiore dei casi a fuori piombo di circa 1 cm (aree rosse) e -0.7 mm (aree blu), localizzate ai bordi dei supporti (dove il gradiente di umidità è sicuramente maggiore rispetto all'interno del supporto), nelle zone di giuntura dei pannelli di Masonite e negli avvallamenti prodotti dalla rete metallica. Nel caso dei dipinti murali "Storie di Enoch e Lamech" e "L'ingresso nell'arca degli animali", da un'attenta osservazione dei DEM fotogrammetrici, si rilevano le deformazioni plastiche lasciate dall'orditura del vecchio telaio in abete rimosso durante i restauri del 2014 (Fig. 5.20). Anche un'immagine scattata in luce radente relativa all'affresco di Paolo Uccello "La creazione degli animali e la creazione di Adamo" mostra le disconnessioni della pittura create dalla complessità dei materiali del supporto (Fig. 5.21) (Frosinini 2021).

Oltre che ai differenti supporti impiegati nei diversi momenti della storia conservativa del chiostro, anche i diversi metodi di esecuzione degli strappi hanno causato micro movimenti dei dipinti con conseguenti ripercussioni sul colore. Nel caso dei supporti composti da rete metallica, impiegati da Domenico Fiscoli all'inizio del Novecento, sono state rilevate sulla superficie dipinta vistose fratture di colore e deformazioni; nella zona centrale de "Il Diluvio Universale" è evidente una netta cesura orizzontale corrispondente a una giuntura di tela sul retro (Fig. 5.22 e 5.23), mentre la superficie de "La Cacciata" presenta vistosi avvallamenti dovuti alla non perfetta planarità della rete metallica al momento della realizzazione del supporto. In ampie aree,

già durante i restauri del 2014 (Frosinini 2021), si leggeva l'impronta della rete metallica sulla superficie, formata per effetto della contrazione e dilatazione degli strati di gesso stesi a diretto contatto con le tele di presupporto. Tutt'oggi sono ancora visibili tali avvallamenti e vanno da circa -0.6 cm a 1.0 cm, ma non sembrano causare danni alla pellicola pittorica (Fig. 5.24)

Tramite il protocollo metodologico descritto in questo lavoro di tesi è possibile dunque visualizzare non solo la composizione dei singoli pannelli del supporto, in maniera non invasiva e non distruttiva, ma soprattutto determinare le deformazioni plastiche delle superfici degli affreschi, individuare i punti critici e monitorarli nel tempo. Il software *Cloud Compare* consente inoltre il calcolo diretto delle deformazioni presenti nelle diverse nuvole di punti processate, offrendo, in fase di sintesi finale e di confronto, la possibilità di rappresentare le informazioni metriche e le statistiche ottenute attraverso grafici e curve gaussiane esplicative. Grazie a questi elaborati è possibile avere una ricognizione immediata e una lettura critica delle deviazioni dimensionali.

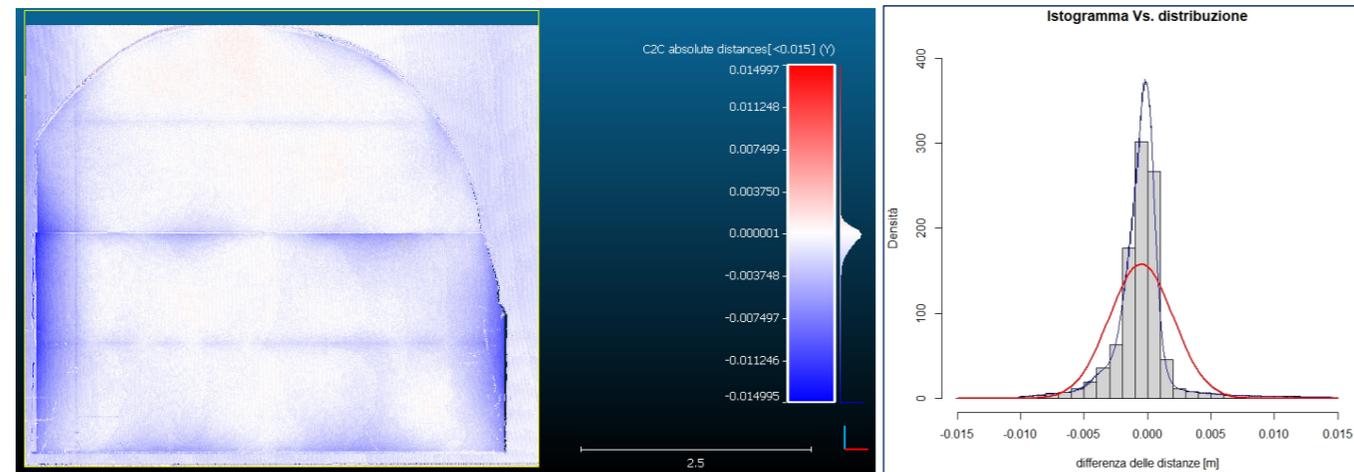


Fig. 5.19 a sinistra, rappresentazione della nuvola ottenuta dalle differenze delle distanze (in m) tra le nuvole al tempo T0 e T1; a destra rappresentazione dell'istogramma delle densità di frequenze e della funzione densità di probabilità delle differenze delle distanze.

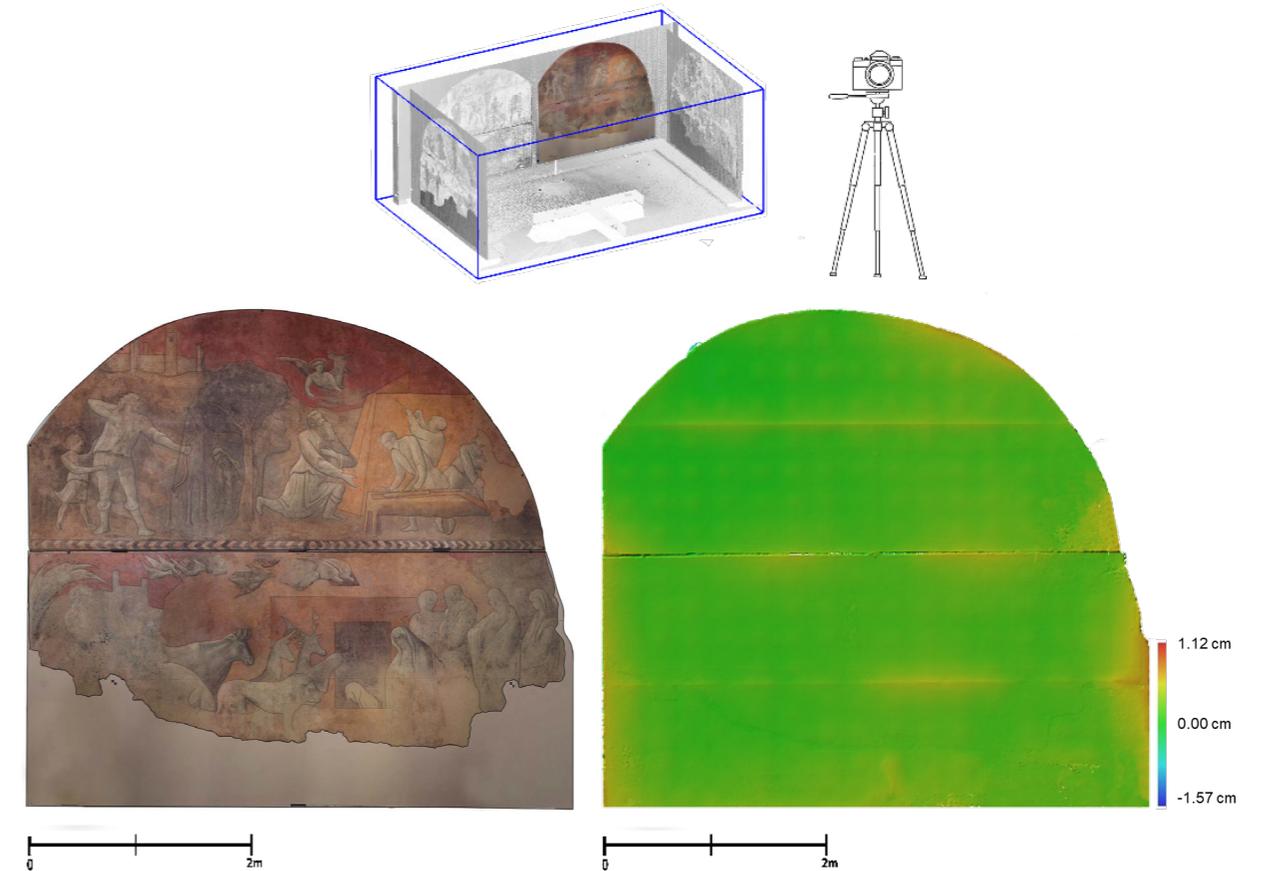


Fig. 5.20 a sinistra fotopiano dell'affresco "La cacciata dal Paradiso terrestre e il lavoro dei progenitori e Il sacrificio di Caino e Abele; Caino uccide Abele" (0.302 mm/pix di risoluzione); a destra il relativo DEM (0.391 mm/pix di risoluzione) con visibile gli avvallamenti causati dalla rete metallica.



Fig. 5.21 immagine scattata in luce radente relativa all'affresco di Paolo Uccello "La creazione degli animali e la creazione di Adamo" (Frosinini, 2021).

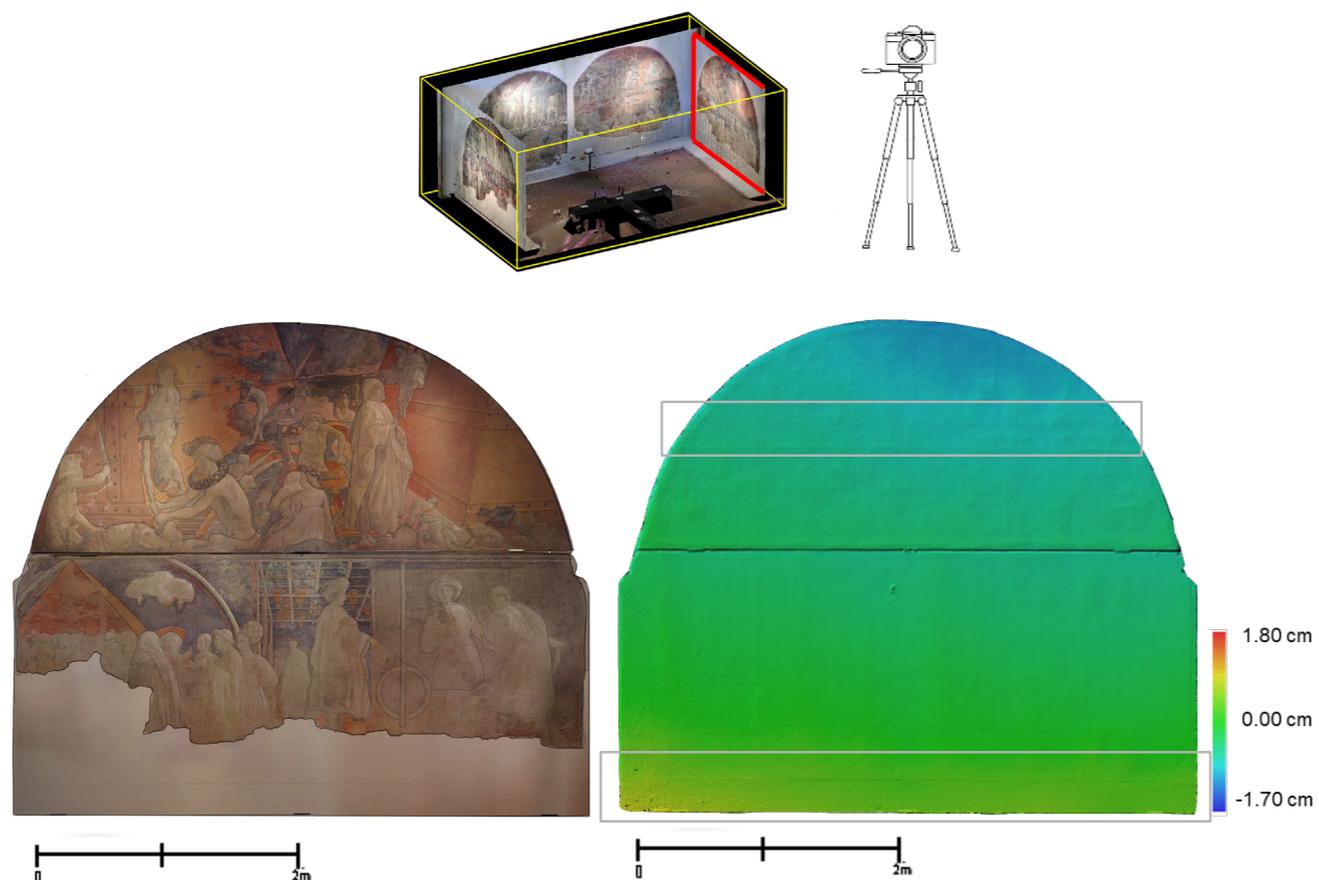


Fig. 5.22 a sinistra fotopiano de "Il Diluvio universale e la recessione delle acque e l'ebbrezza di Noè" (risoluzione di 0.313 mm /pix) e a destra il DEM fotogrammetrico (risoluzione 0.725 mm/pix), con visibile l'impronta della tela in alto e lo "zoccolo" in Masonite nella fascia inferiore.



Fig. 5.23 zona centrale de "Il Diluvio Universale" dove è evidente una netta cesura orizzontale corrispondente a una giuntura di tela sul retro dell'affresco.

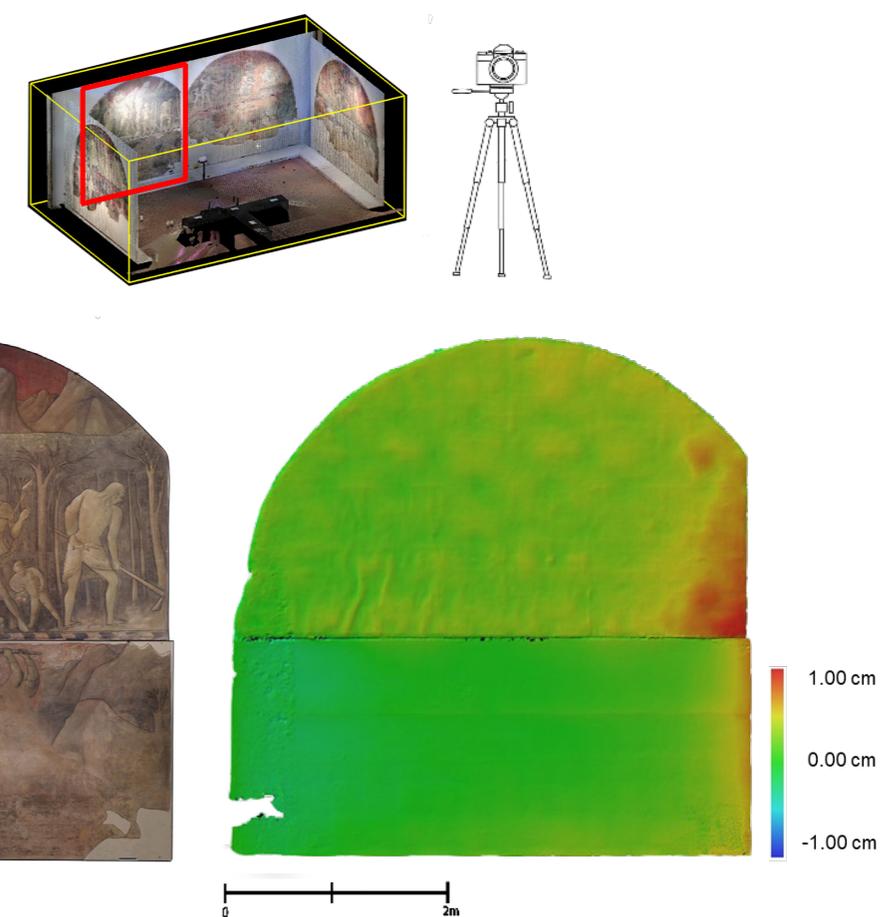


Fig. 5.24 a sinistra fotopiano dell'affresco "La cacciata dal Paradiso terrestre e il lavoro dei progenitori e Il sacrificio di Caino e Abele; Caino uccide Abele" (0.302 mm/pix di risoluzione); a destra il relativo DEM (0.391 mm/pix di risoluzione) con visibile gli avvallamenti causati dalla rete metallica.



CAPITOLO 6

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI
DEL PROTOCOLLO DEFINITO SU VARI CASI DI STUDIO:
VERIFICA DELLE CRITICITÀ E DELLE POTENZIALITÀ DEL WORKFLOW PROPOSTO

CAPITOLO 6

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEL PROTOCOLLO DEFINITO SU VARI CASI DI STUDIO: VERIFICA DELLE CRITICITÀ E DELLE OPPORTUNITÀ DEL WORKFLOW PROPOSTO.

In tale capitolo vengono illustrati i risultati ottenuti dalla sinergia delle metodologie proposte in questo lavoro di tesi applicati su altri casi di studio, nazionali e internazionali.

Le esperienze applicative sono state condotte durante il percorso di Dottorato e finalizzate ad indagare gli aspetti morfometrici, materici e di degrado di alcuni siti appartenenti al Patrimonio Architettonico, tra cui le facciate rinascimentali di Palazzo Lenzi in piazza Ognissanti a Firenze, il monastero di Saint Miquel d'Escornalbou a Tarragona (Spagna) e il castello-fortezza di Trogir (Croazia).

Le operazioni di documentazione multidisciplinare dei complessi architettonici si sono basate sull'integrazione tra attività di rilievo digitale *reality-based*, indagini su fonti storico-archivistiche e analisi archeologiche dedicate alla lettura stratigrafica delle murature e alla caratterizzazione delle tecniche costruttive. Gli *output* di queste operazioni hanno permesso di sviluppare elaborati grafici affidabili ed ipotesi di ricostruzione relative alla morfologia degli edifici per ognuno dei suoi periodi storici principali.

In tale capitolo verranno inoltre illustrati i limiti e delle opportunità emersi dal *workflow* proposto sia in relazione alle varie scale architettoniche, sia in base delle peculiarità strumentali.

6.1 Le facciate rinascimentali di Palazzo Lenzi in piazza Ognissanti (Firenze)

Il rilievo mediante IRT di facciate di edifici storici, di monumenti o di manufatti è ampiamente diffuso nell'ambito della conservazione del Patrimonio Culturale. Il rilievo delle proprietà termiche delle superfici di facciate monumentali è di estremo interesse e utile per l'individuazione di difetti nella muratura, infiltrazioni d'acqua, umidità di risalita e rifacimenti. Nel presente caso di studio viene descritta la procedura per creare le nuvole di punti IRT mediante l'elaborazione fotogrammetrica di immagini termiche all'infrarosso (IRT) insieme alle nuvole di punti VIS ottenute dallo stesso dispositivo, ovvero la termocamera, con un miglioramento dei tempi di lavoro. Il *workflow* utilizzato è analogo a quello analizzato in tale elaborato di tesi (si veda Capitolo 4) che, in sintesi, prevede l'implementazione dell'acquisizione delle immagini IR, la loro conversione in

immagini 32 tiff a banda singola tramite il *plugin* di *Image J*, l'elaborazione delle immagini termiche e l'estrazione dei dati grezzi per il calcolo finale della distribuzione della temperatura.

Il metodo è stato convalidato anche con il rilievo delle facciate di palazzo Lenzi in piazza Ognissanti a Firenze (Fig. 6.1). Il palazzo, oggi sede del consolato francese a Firenze, ha subito notevoli trasformazioni negli ultimi secoli in termini di ristrutturazioni e modifiche, anche per quanto riguarda le sue facciate. Palazzo Lenzi rappresenta un'importante testimonianza dell'architettura rinascimentale fiorentina, con le facciate dipinte nel 1456 con la tecnica del graffito (Menicali, 1992; Bocchi-Cinelli, 1677). Dagli interventi passati è emersa una stratigrafia: sotto l'attuale facciata dipinta, sono presenti sia porzioni di un graffito più antico sia, a un livello ancora più profondo, un intonaco grossolano e grezzo, graffiato con vari motivi, rivelato da significative perdite di malta. Nel corso dei secoli ha subito diversi rifacimenti e restauri, l'ultimo dei quali nel 1984. (SBAA_FI, 165/1°/1984). L'obiettivo dell'indagine IRT e fotogrammetrica è stato quello di evidenziare le aree interessate da fenomeni di degrado (comprese quelle già restaurate) e di consentire una lettura stratigrafica della facciata frontale in via non distruttiva, utile anche per orientare ulteriori indagini analitiche (Brizzi et al. 2022)

Come precedentemente osservato, le immagini RGB salvate dalla termocamera hanno una risoluzione molto bassa, pari a 348 x 464 pixel, la stessa delle immagini IRT. Tuttavia, utilizzando lo stesso dispositivo, è possibile correlare contemporaneamente i dati IR e RGB del visibile, con un'acquisizione più rapida ed economica. In questo modo le possibili fluttuazioni termo-igrometriche che possono verificarsi tra i diversi scatti fotografici risultano maggiormente controllate e anche gli errori di compensazione o di orientamento tra sensori IR e Visibili sono trascurabili grazie alla stessa posizione del punto di ripresa.

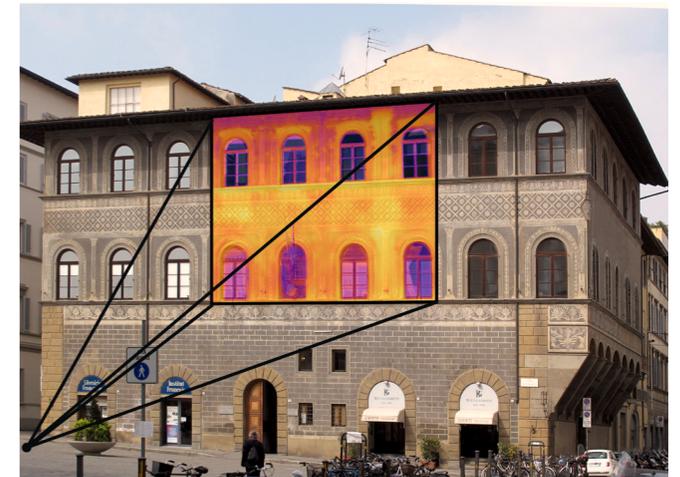
Questa strategia è stata applicata in questa esperienza di ricerca attraverso la co-registrazione tramite GPCs (*Ground Control Points*) tra nuvola IR e RGB, sfruttando i punti naturali riconoscibili, ad esempio gli angoli delle finestre e



Fig. 6.1 a sinistra: palazzo Lenzi, in piazza Ognissanti a Firenze. A destra: ripresa termografica sulla facciata, decorata a graffito, di palazzo Lenzi.

delle porte della facciata del palazzo. Questi punti sono stati utilizzati come GPCs allo scopo di: (a) registrare la nuvola di punti fotogrammetrici nello stesso sistema di riferimento locale dei dati RGB; (b) valutare l'accuratezza metrica dei risultati finali dopo l'aggiustamento del *bundle block adjustment*.

Per rilevare un'area così vasta, quale l'intera facciata di un edificio storico, mantenendo una distanza dall'oggetto relativamente ravvicinata, il rilievo delle fasce in alto è stato effettuato disponendo la termocamera su un'asta telescopica in fibra di carbonio (*Top-See*) utilizzata per i comuni rilievi fotogrammetrici. Nel rilievo infatti il controllo del campo visivo (FOV) e dell'inquadratura è una operazione tecnica che deve essere condotta con molta attenzione in quanto può incidere sulla qualità metrica degli elaborati finali. Per documentare la facciata di un edificio servono inquadrature a piano verticale e il più possibile frontali (Fiorini, 2012). In questo caso, grazie all'ausilio dell'asta telescopica, è stato possibile operare un controllo dell'inquadratura piuttosto preciso: la termocamera è stata fissata sulla cima all'asta telescopica (altezza massima 7,5 m) e connessa, tramite *bluetooth*, ad un *monitor* per vedere, da terra, l'immagine ripresa e attivare il pulsante per lo scatto della fotocamera. Tale tecnica ha permesso l'acquisizione di 55 termogrammi utilizzati per la costruzione della nuvola di punti IR per un'area di copertura totale di 591 m². La co-registrazione della nuvola densa Vis e IR è stata effettuata utilizzando i punti di controllo a terra: la verifica della posizione GPS e gli errori relativi sono stati stimati in Fig. 6.2. Per verificare la corretta correlazione tra le due nuvole di punti (quella RGB e quella



IR) è stato calcolato l'errore quadratico medio (*Root Mean Square Error*): esso risulta raddoppiato per la nuvola termica rispetto a quella visibile, ma ancora relativamente basso (4,7 cm contro 2,4 cm) considerando la bassa risoluzione delle immagini (tabella 6.1).

Dopo la creazione delle nuvole dense IR e RGB, si è proceduto con la realizzazione della *mesh*, ed il loro rispettivo allineamento, come mostrato in Fig. 6.3.

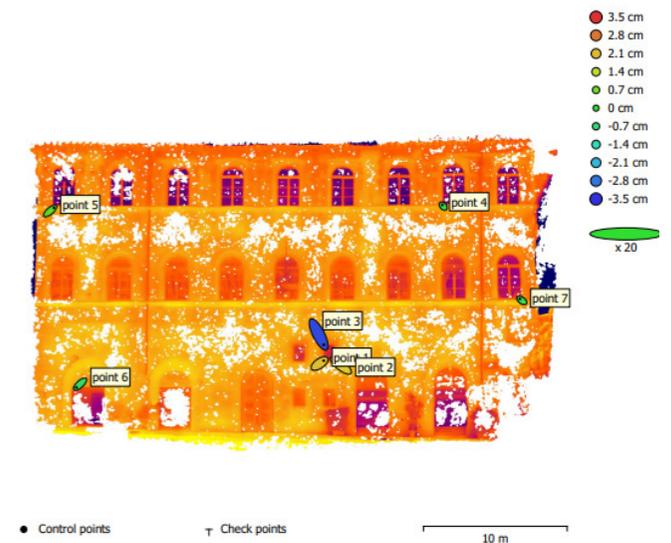


Fig. 6.2 posizione dei GPCs e stime dell'errore. L'errore sull'asse Z è rappresentato dal colore dell'ellisse. Gli errori sugli assi X e Y sono rappresentati dalla forma dell'ellisse. Le posizioni stimate dei GCP sono contrassegnate da un punto o da una croce.

	Errore X (cm)	Errore Y (cm)	Errore Z (cm)	Errore Totale (cm)
Nuvola di punti Vis	1.6359	1.69642	0.45313	2.39986
Nuvola di punti IR	2.85764	3.37601	1.6544	4.72235

Tab. 6.1 errore quadratico medio (RMSE) dei punti di controllo (GCPs).

Per valutare se le nuvole di punti dense TIR sono state generate e co-registrate correttamente rispetto a quella di riferimento e per stimare la loro accuratezza spaziale e geometrica, l'analisi delle distanze residue è stata eseguita utilizzando l'algoritmo *Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2)* implementato nel software *CloudCompare*. L'algoritmo misura la variazione media della superficie lungo la direzione normale e calcola esplicitamente un intervallo di confidenza

locale (Tucci et al., 2018). In particolare, questo strumento è stato scelto rispetto al comune metodo di distanza *Cloud-to-Cloud (C2C)* per la sua robustezza nel calcolare le distanze residue locali e nel considerare i cambiamenti nella densità dei punti e nel rumore (Guilbert et al., 2020). I parametri statistici delle distanze residue tra le nuvole di punti TIR e ottiche generate attraverso lo strumento M3C2 sono illustrati in Fig 6.4. La distanza media M3C2 tra la nuvola di riferimento SfM VIS e la nuvola di punti IR è di -0,13 m (dev. std. =0,43 m).

Inoltre, come realizzato nel Capitolo 4 per gli affreschi del chiostro Verde, è stato eseguito un confronto tra le distribuzioni di temperatura delle immagini FLIR e della nuvola di punti finale per valutare eventuali errori legati all'operazione di fusione. L'istogramma delle frequenze è stato creato attraverso il software MATLAB®, esaminando

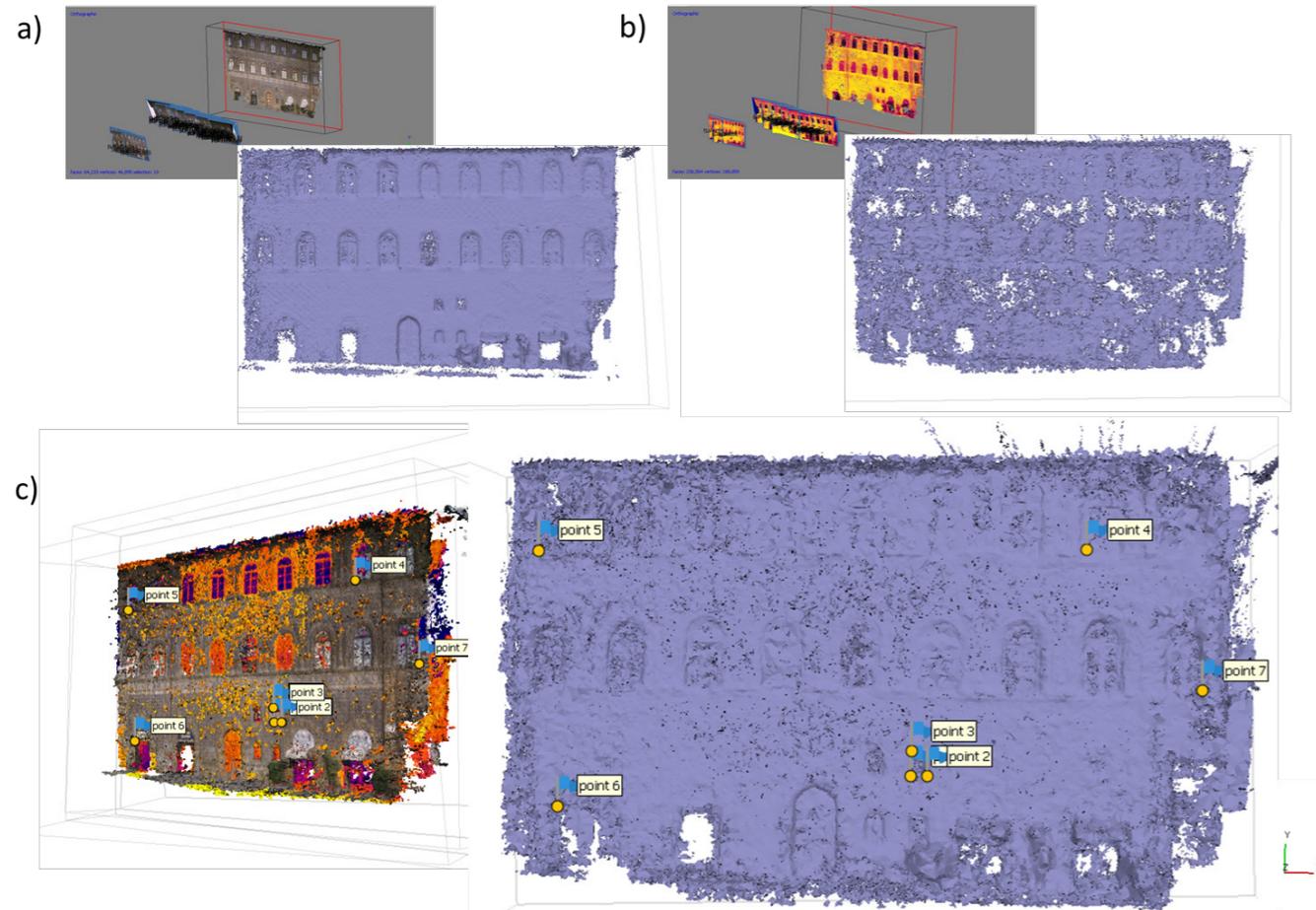


Fig. 6.3 a) modello mesh del rilievo RGB da termocamera b) modello mesh da rilievo IRT c) modello solido allineato da rilievo RGB e IRT.

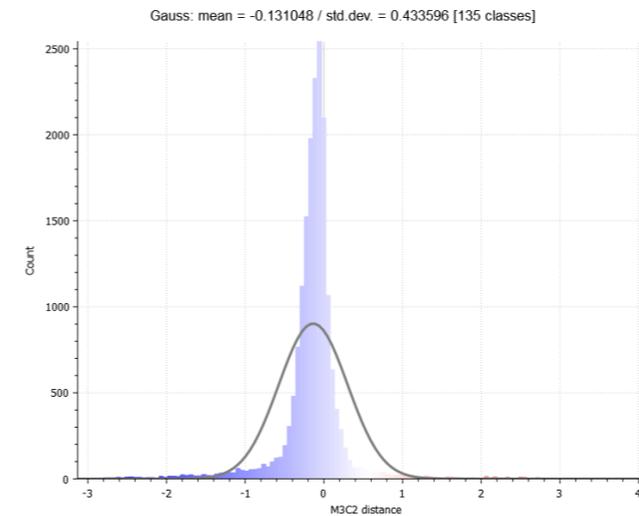


Fig. 6.4 rappresentazione dell'istogramma delle densità di frequenza e della funzione densità di probabilità delle differenze delle distanze tra le nuvole RGB e IR prodotte dalla termocamera.

la stessa area di 30 x 30 cm² estratta sia dai termogrammi elaborati sia dalla nuvola IR risultante. Dall'osservazione della distribuzione delle classi di temperatura della nuvola di punti (Fig. 6.5) è possibile discernere un elevato livello

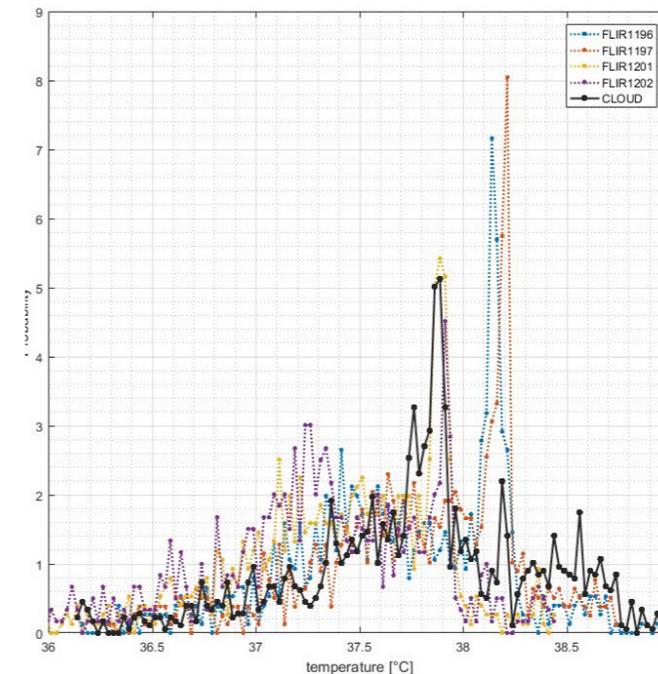


Fig. 6.5 distribuzione delle densità di frequenze in rapporto alla distribuzione delle temperature rilevate dai singoli termogrammi (FLIR 1196, 1197, 1201, 1202) e dalla nuvola IRT risultante.

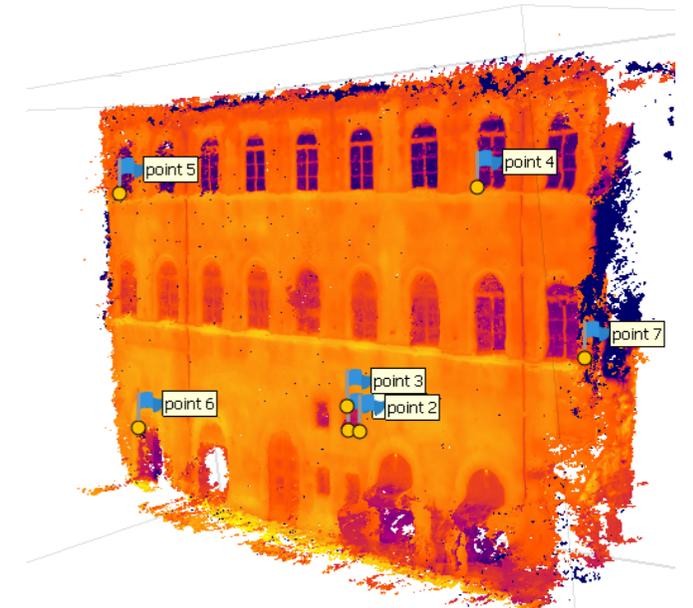


Fig. 6.6 modello mesh RGB della termocamera e mappatura delle texture dalle immagini TIR.

di somiglianza tra le distribuzioni di frequenza relative delle diverse acquisizioni.

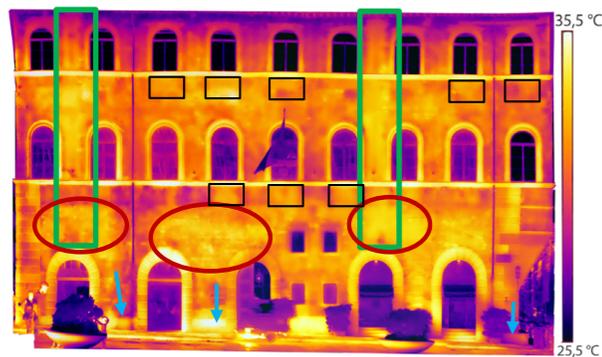
L'omogeneità della distribuzione della temperatura è evidente per i valori estratti sia dai termogrammi che dalla nuvola di punti TIR. Tra le distribuzioni di temperatura 2D e 3D si riscontrano solo lievi differenze, ma poiché queste rientrano nell'intervallo di confidenza della sensibilità di misura della termocamera IR (± 2 °C), possono essere considerate trascurabili. Inoltre, una certa eterogeneità può essere dovuta alla posizione relativa della telecamera e dell'oggetto rilevato, che può creare discontinuità termiche soprattutto quando l'area analizzata è composta da materiali diversi e forti irregolarità superficiali.

Infine, la nuvola di punti finale texturizzata risulta avere una densità di 0,2 punti/cm² (Fig. 6.6) e l'ortomosaico ha una risoluzione finale di 2,62 cm/pix.

Da un attento esame dell'ortomosaico di Fig. 6.7 è possibile osservare diversi elementi critici, tra cui:

- anomalie termiche riscontrate al di sopra delle porte della facciata (aree evidenziate in rosso). Esse sono dovute alla presenza di distacchi e perdita di coesione dei diversi strati di intonaco che compongono il graffito;

- presenza di pluviali incassati nella muratura (aree evidenziate in verde), che sono stati probabilmente interrotti durante precedenti lavori di ristrutturazione del 1984;
- le aree sotto le finestre del primo e del secondo piano (evidenziate in nero), mostrano una temperatura più elevata (circa 30 °C) rispetto alla zona circostante. Esse corrispondono alle pompe di riscaldamento negli ambienti interni;
- le finestre dell'ultimo piano, pur essendo arcuate, presentano un'intelaiatura interna rettangolare;
- alla base dell'edificio, quella a contatto con il piano stradale, è evidente la presenza di fenomeni di risalita capillare, tuttora in corso.



- Pluviali nascosti
- Risalita capillare
- Distacchi di intonaci
- Pompe di calore

Fig. 6.7 ortomosaico IR ottenuto dalla nuvola IRT e immagine scattata nel visibile, con evidenziati diversi processi di degrado che interessano la facciata di palazzo Lenzi.

6.2 Il monastero di Saint Miquel d'Escornalbou a Tarragona (Spagna)

L'analisi e lo studio del monastero di Saint Miquel d'Escornalbou prende avvio da un seminario svolto a Novembre 2021 in Spagna all'interno del progetto europeo F – ATLAS, che ha come obiettivo la valutazione dello stato attuale della rete francescana italo- portoghese- spagnola per definire una banca dati di documentazione per la conoscenza, la conservazione, la tutela e la promozione dei beni culturali. Attraverso tecniche tradizionali ed innovative sono elaborate delle metodologie e protocolli che mirano ad analizzare il degrado di questi complessi architettonici francescani che nei secoli hanno perso la loro funzione e il loro valore originario, al fine di definire alcune strategie comuni di conservazione e gestione del patrimonio. Durante il seminario è stato analizzato il castello monastero di Saint Miquel di Escornalbou che si trova sulla cima del monte omonimo nel comune di Rudecanyes in provincia di Tarragona, (Fig 6.8, 6.9).

L'attuale complesso monumentale è il risultato della sedimentazione di popoli e eventi storici che hanno dominato questa zona a partire dal neolitico a (Soler Sala et al., 2023). Scavi archeologici recenti hanno dimostrato che il monastero era originariamente una fortificazione militare. L'elevata panoramicità del sito garantiva sorveglianza e difesa del territorio circostante, tanto è vero che nel primo secolo i romani costruirono il primo insediamento nella zona a presidio delle miniere di galena e del porto urbano di Tarragona. La costruzione del complesso monastico è legata alla donazione fatta dal re Alfonso el Castro al canonico Joan de Sant Boi nel 1170 del castello di origine andalusa situato in questo luogo con una quadruplici missione: restaurare la fortezza, ripopolare il territorio circostante, costruire una chiesa dedicata a San Michele e istituire un canonicato agostiniano. A partire dal XIV secolo, la comunità entrò in un lungo periodo di turbolenze, che riguardarono sia la manutenzione degli edifici sia la configurazione di una comunità sempre più piccola, che nel 1574 aveva un solo canonico. Così, al momento della nascita della riforma francescana in Europa, il vescovo di Tarragona cedette il luogo ai Francescani Osservanti (1683), che seppero stabilire una comunità duratura in questo luogo. L'aspetto attuale del monastero di Saint Miquel d'Escornalbou si deve a uno dei più importanti esponenti del Rinascimento catalano, Eduard Toda, che investì parte della sua fortuna nell'acquisto di



Fig. 6.8 localizzazione e vista dall'alto del complesso monastico di Saint Miquel d'Escornalbou.

questo luogo. Il monastero fu infatti restaurato e trasformato in una residenza. Le tracce di questo lungo processo hanno segnato l'attuale stato dell'arte del monastero (Fig 6.10). Oggi non è facile distinguere tra fasi medievali e moderne e gli eventi degli ultimi secoli contemporanei, compreso il restauro di Toda (Ramos, 2021).

Tuttavia, oggi giorno, lo stato dell'arte del monastero rappresenta una sfida nel campo della conservazione, a causa del naturale degrado delle parti originarie e dell'assenza prolungata di interventi di manutenzione. Ad esempio, il monastero presenta molte criticità strutturali soprattutto sul lato nord-ovest e sulle facciate frontali della chiesa che sembrano essere di recente formazione. La chiesa presenta inoltre un avanzato degrado delle superfici esterne e interne che interessa sia la pietra che la malta di allettamento. In particolare, sono presenti singolari forme di degrado legate all'alveolizzazione, all'erosione chimico-fisica e all'esfoliazione della pietra locale utilizzata per la costruzione dell'intero complesso monastico. La presenza di biodegrado delle superfici si manifesta anche con la crescita di erbe infestanti ed è diffusa in varie parti delle superfici del castello, soprattutto in quelle esterne, dove si verifica una notevole percolazione di acqua piovana.

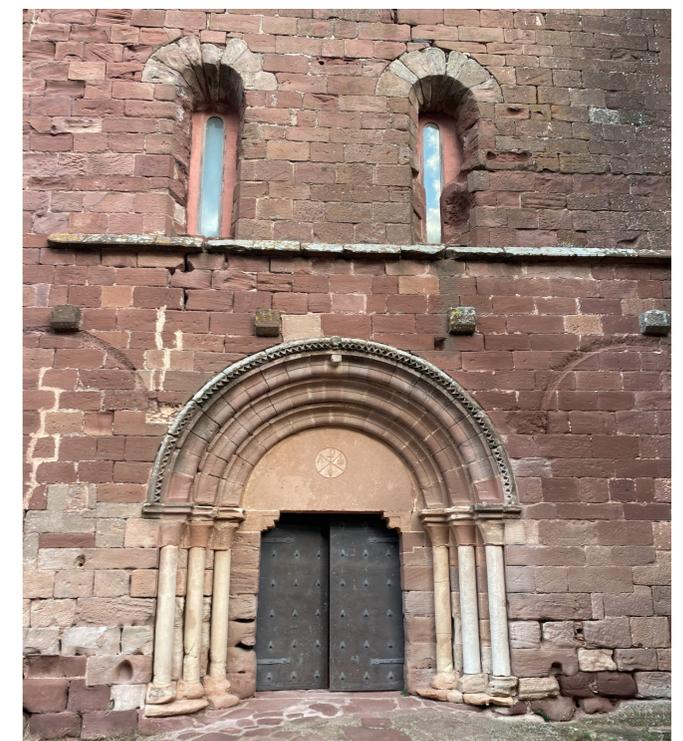


Fig. 6.9 portale d'ingresso della chiesa di Saint Miquel d'Escornalbou.

Il presente lavoro si propone di indagare le vicende storico-costruttive del complesso monastico attraverso fonti storiche e rilievi digitali integrati utili a comprendere le principali problematiche architettonico-strutturali necessarie per un eventuale intervento conservativo, (Brizzi, 2023). A tal fine sono state utilizzate tecniche di rilievo diretto e indiretto (Fig. 6.11), tra cui:

1) laser scanner Z+F IMAGER 5016. sono stati effettuati 126 punti di stazione al fine di acquisire il dato metrico e per l'elaborazione della nuvola di punti.
2) fotogrammetria da terra, che ha permesso l'elaborazione

di fotopiani per l'integrazione dei dati colorimetrici e dei dettagli di alcune superfici. Questa metodica è stata integrata anche con la fotogrammetria aerea da drone (effettuata attraverso un DJI 2 mini).

3) termografia IR, che ha permesso di indagare il monastero tramite l'infrarosso, così da valutare lo stato di conservazione del complesso, ottenere una lettura stratigrafica e di ipotizzare trasformazioni murarie avvenute nel corso dei secoli.

Per supportare le operazioni di fusione dei dati geometrici e radiometrici, è stato necessario un rilievo metrico 3D completo per ottenere la base geometrica, che rappresenta il punto di

partenza per le successive operazioni di fusione dei dati. La nuvola di punti, coadiuvata dalle riprese fotogrammetriche, rappresenta un riferimento affidabile per l'integrazione e la co-registrazione delle immagini IRT ottenute dal rilievo IR. Un estratto di modello di nuvola di punti 3D termica e RGB allineata e registrata su Agisoft Metashape, è mostrata in Fig 6.12.

L'indagine termografica all'infrarosso è stata condotta in modalità passiva, sfruttando cioè la diversa capacità termica dei materiali che compongono la muratura e lo scambio che

può avvenire tra di essi in determinati momenti della giornata a seguito delle condizioni meteo ambientali delle stagioni. Per ogni prospetto del monastero sono state acquisite un certo numero termogrammi, inizialmente in modalità *long-range*, posizionandosi cioè a una distanza di circa 10 m dall'oggetto, e poi in modalità *short-range*, per evidenziare alcuni elementi. In Fig. 6.13 è mostrata una planimetria generale con evidenziate i prospetti illustrati in questo studio.

Alcuni elementi, visibili solamente nello spettro IR, sono stati identificati in relazione ai rifacimenti strutturali effettuati nel corso dei secoli:

- Nella foto storica di Figura 6.14 compare la presenza di una cappella laterale nel lato nord-ovest, demolita nel 1907 da Eduard Todà (Sanabra Ramos, 2021). Il confronto di questa immagine con il fotopiano termico mostra (come di evince anche dai termogrammi segnati dai numeri 1 e 2), la presenza di un arco tra la seconda e la terza finestra della chiesa, probabilmente risalente all'apertura dell'antica cappella. È inoltre evidente la presenza di abbondanti patine biologiche e di umidità capillare di risalita dal terreno.

- Sul prospetto frontale di Fig. 6.15 (fotopiano G-G') sono visibili due fasce orizzontali all'altezza delle finestre: esse sono la traccia della falda inclinata del tetto di un antico nartece, come si vede anche nel prospetto Nord-Ovest (Fig. 6.16). Infatti anche in tale prospetto, i due termogrammi *short-range* (punti 1 e 2) mostrano la traccia della falda inclinata del tetto del nartece di ingresso e dei suoi archi di appoggio.

- Nel prospetto sud della chiesa (fotopiano L-L'), sono ancora visibili le due fasce orizzontali rilevate sulla facciata: corrono lungo tutta la muratura e rappresentano l'inizio della falda di un'antica loggia presente nel chiostro. (Fig. 6.17). Evidenziata dal numero 1, è visibile anche una presunta antica porta di accesso alla chiesa dal chiostro loggiato.

La ricerca multidisciplinare, coadiuvata dalle fonti storiche, ha permesso la lettura di alcuni elementi architettonici antichi, quali: tracce di un nartece d'ingresso sul fronte della chiesa, un'antica cappella nella facciata Nord-Ovest e una loggia coperta a due livelli all'interno del chiostro. In Fig.6.18, viene fornita una modellazione 3D (realizzata con il software *Rhinoceros*) che offre una visione dello stato attuale del complesso monastico e, evidenziati in rosa, tutti gli elementi rilevati in questo lavoro grazie all'approccio multi-sensore.

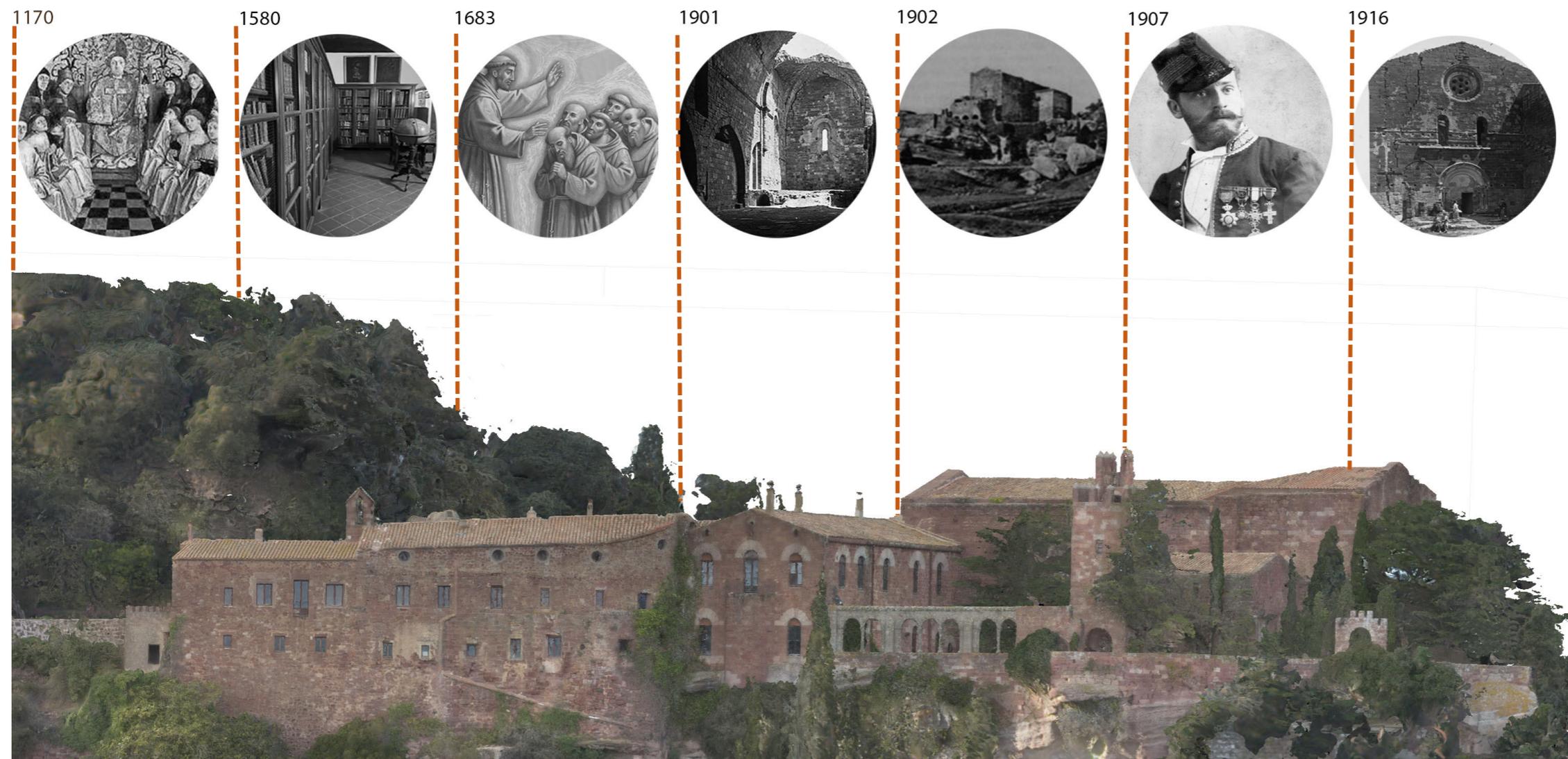


Fig. 6.10 linea del tempo con vista della nuvola di punti ottenuta da rilievo fotogrammetrico aereo con drone.

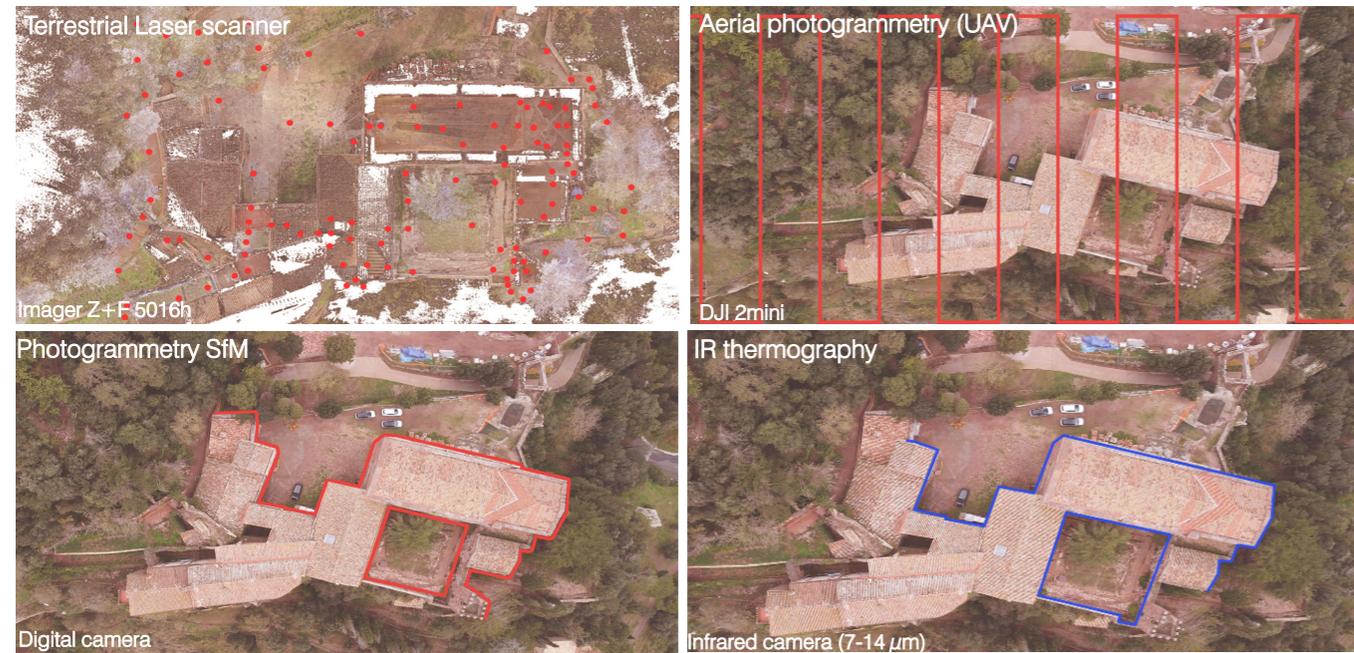


Fig. 6.11 set-up metodologico utilizzato per il caso di studio del complesso di Saint Miquel d'Escornalbou.

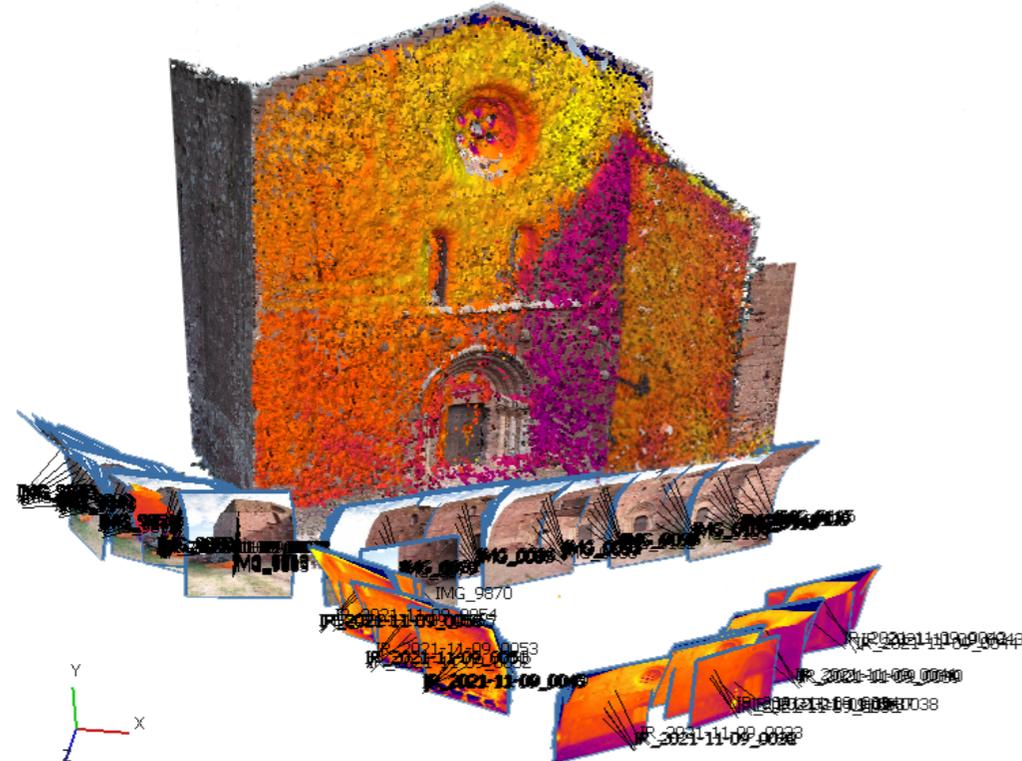
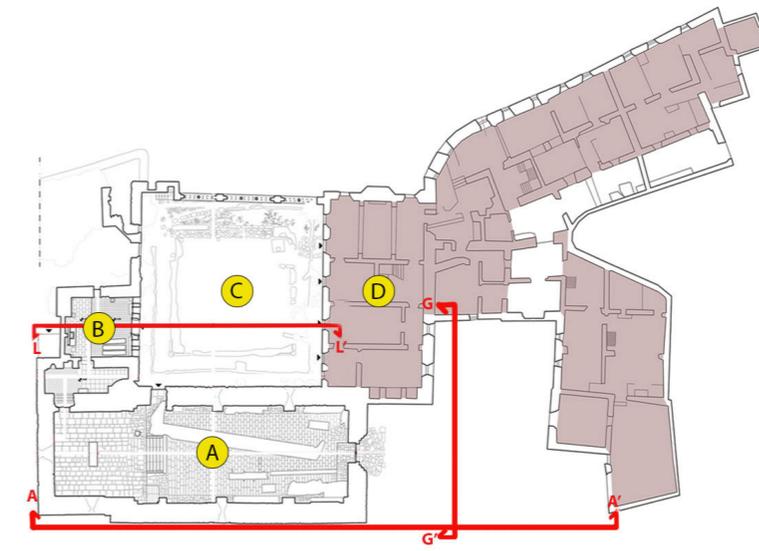


Fig. 6.12 integrazione dati fotogrammetrici RGB e IR sulla facciata della chiesa di Saint Miquel d'Escornalbou.



A - Chiesa of Sant Miquel d'Escornalbou;
 B - Sala Capitolare;
 C - Chiostro;
 D - Villa Signorile.

Fig. 6.13 planimetria generale del complesso indicazione degli ambienti principali: A- chiesa di Sant Miquel; B-Sala del Capitolo; C- Chiostro; D- Villa Signorile, e i prospetti oggetto di questo lavoro (sezioni A-A', G-G', L-L')

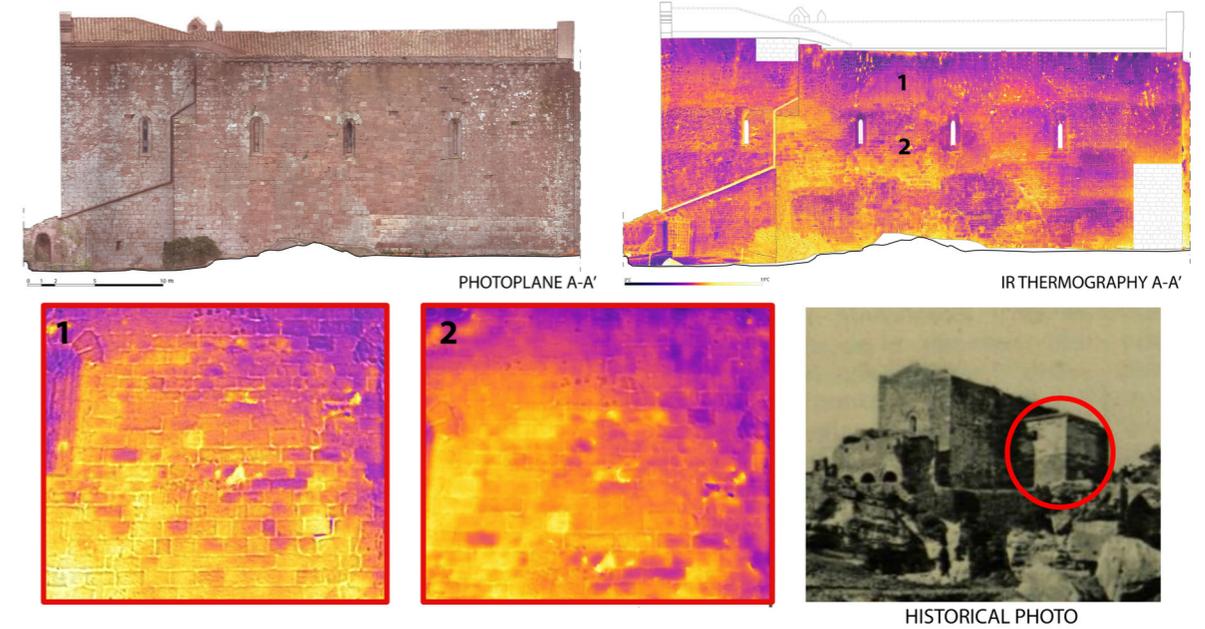


Fig. 6.14 prospetto Nord-Ovest della chiesa di Saint Miquel d'Escornalbou. Sopra: fotopiani VIS e IR. Sotto: due termogrammi short-range e la foto storica.



Fig. 6.15 prospetto frontale della chiesa di Saint Miquel d'Escornalbou. Sopra: fotopiani VIS e IR. Sotto: due termogrammi short-range e la foto storica.

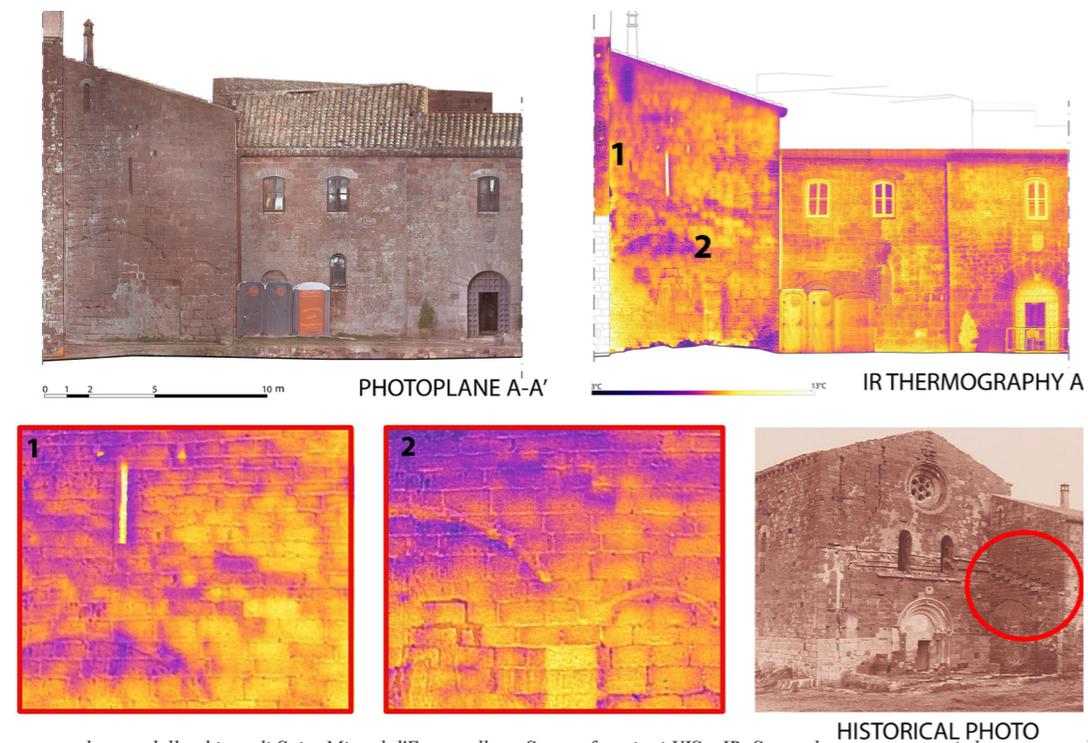


Fig. 6.16 prospetto nord-ovest della chiesa di Saint Miquel d'Escornalbou. Sopra: fotopiani VIS e IR. Sotto: due termogrammi short-range e la foto storica.

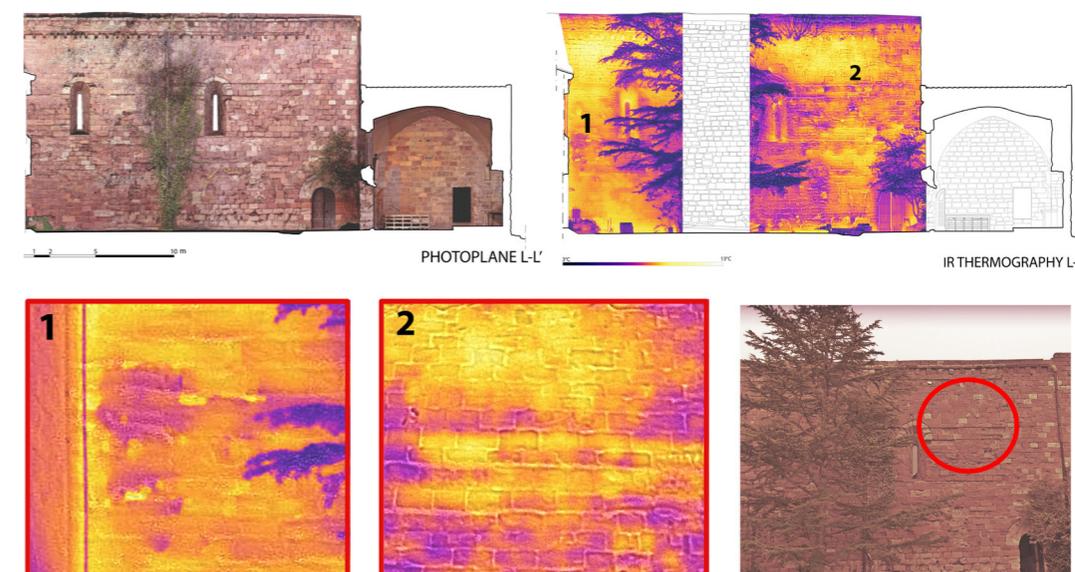


Fig. 6.17 prospetto Sud della chiesa di Saint Miquel d'Escornalbou. Sopra: fotopiani VIS e IR. Sotto: due termogrammi short-range e la foto nel visibile.

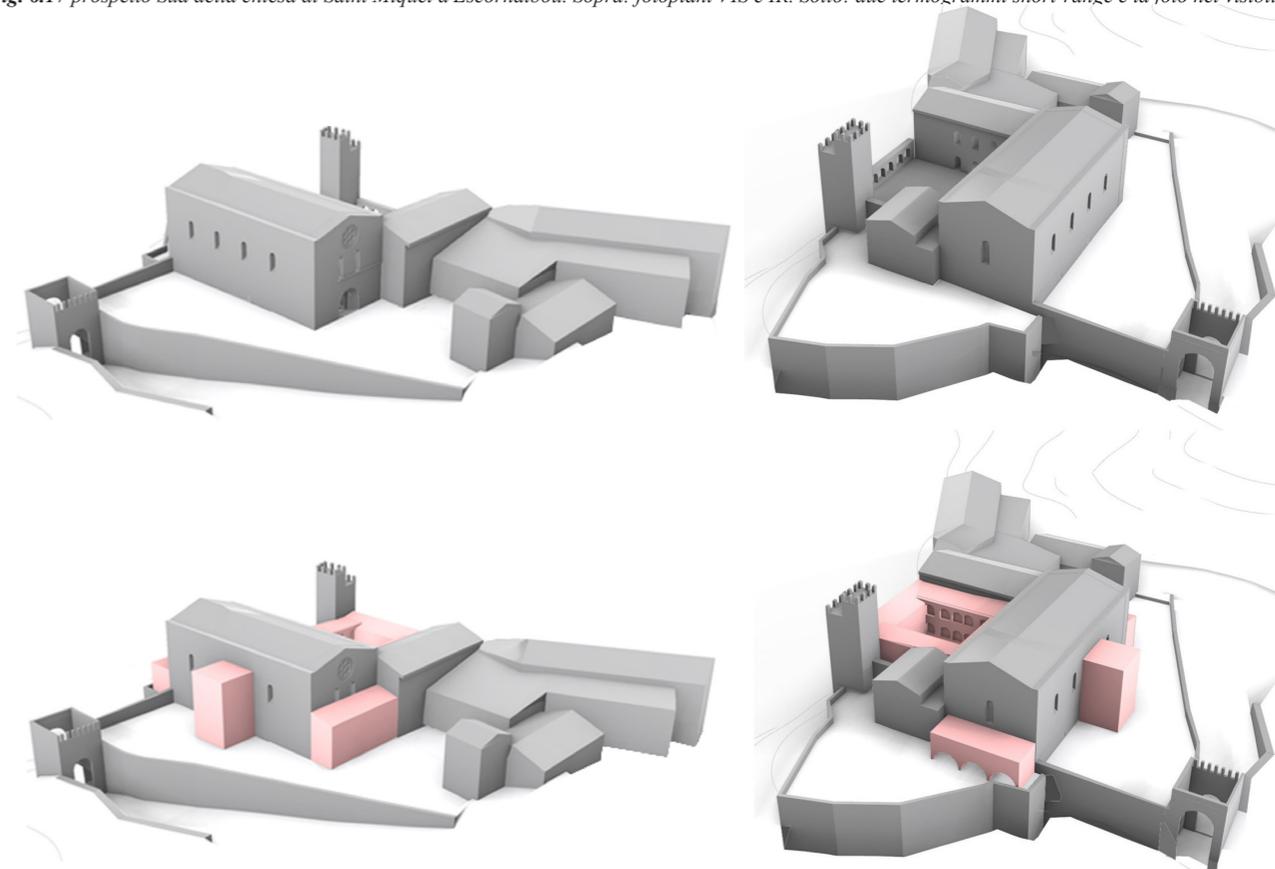


Fig. 6.18 modello del complesso di Saint Miquel d'Escornalbou allo stato attuale e con ipotesi ricostruttiva degli elementi architettonici emersi dalle analisi multi-risoluzione e multi-banda (rilievo termografico IR).

6.3 Il castello-fortezza di Trogir (Croazia)

Il lavoro eseguito presso il castello-fortezza di Trogir (Croazia) ha preso avvio dal *workshop REUSO* effettuato nel 2019 e nuovamente nel 2021 nell'isola di Trogir e reso possibile grazie alla convenzione tra Università degli Studi di Firenze dipartimento di architettura, dipartimento di architettura ed ingegneria di Split ed il CNR italiano. Il workshop aveva come obiettivo quello di fornire un quadro di riferimento dello stato dell'arte del centro storico della città dei suoi monumenti, inseriti nell'UNESCO World Heritage list dal 1997. Un'azione dettata dalla necessità di avere un quadro di riferimento dello stato dell'arte della città storica e dei suoi monumenti. Uno studio del patrimonio storico culturale della città costituisce infatti il punto di partenza per la realizzazione di iniziative di valorizzazione e rigenerazione durature nel tempo, così come previsto dalle direttive UNESCO WHC (Francia) e ICOMOS (Canada). L'esperienza compiuta ha consentito di ottenere una base documentale tridimensionale del Patrimonio Architettonico di Trogir e delle sue più rilevanti emergenze monumentali e potrà essere utilizzata come supporto per programmi di conservazione del patrimonio, offrendo la possibilità di una continua accessibilità digitale che garantisca nel tempo un punto fermo per il futuro monitoraggio sullo stato di conservazione del sito (Convenzione per la salvaguardia del patrimonio culturale immateriale 2003). L'output

principale del progetto TROGIR è stato, in primo luogo, la costruzione di un supporto documentale per l'individuazione dei fenomeni di degrado naturale e patologico che incidono sul carattere prestazionale del castello del Kamerlengo a Trogir, individuandone cause, segni di dissesto e modalità di diagnosi, al fine di offrire modalità aggiornate di analisi e strumenti di pianificazione per opportuni interventi di ripristino utili a garantire la durabilità delle componenti edilizie nel tempo (Ricciarini, 2019). Una veduta di una parte del castello è mostrata in Fig. 6.19.

Fondata nel III secolo a.C. come insediamento commerciale dai coloni greci l'isola in cui si trova la città di Trogir vide la sua massima espansione durante il periodo romano, quando la città venne racchiusa da cinta fortificate. Successivamente, nel X secolo d.C tutta la Dalmazia venne occupata dai bizantini fino a quando, nel 1420, venne conquistata dalla Repubblica di Venezia. A partire da questa data vennero ammodernate le fortificazioni con la costruzione del castello del Kamerlengo che occupa la costa sud-occidentale dell'isola. Oggi la città di Trogir si presenta ben conservata mantenendo le sue caratteristiche di città medievale costruita su una base classica con un sistema di strade strette racchiuse all'interno dell'antica cerchia muraria sopravvissuta solamente per alcuni tratti è ben visibile intorno alla porta sud e nord (Fig. 6.20). Quello che oggi sicuramente rimane dell'antica fortificazione cittadina è il castello del Kamerlengo, che ha pianta trapezoidale con un mastio monumentale poligonale a sud- ovest e torri minori



Fig. 6.19 castello del Kamerlengo, nell'isola di Trogir (Croazia).

negli altri lati. Le strutture murarie sono del tipo a sacco costruite da un doppio paramento di conci di pietra calcarea legati da malta. La fortezza originariamente inserita nelle mura preesistenti nei lati ovest e sud mura e delimitata da un fossato nei lati est e nord: l'accesso principale al castello avveniva dal lato della città alla quale era collegato da un ponte che passava sopra il canale (Bulfone Gransinigh, 2020; Bertocci, 2019). L'aspetto attuale della fortezza è il risultato

delle costruzioni della metà del XX secolo durante le quali sono state restaurate le merlature delle cortine murarie le torri sud est e sud ovest e le gallerie interne infatti con l'avvento dei francesi furono demolite le corti interne al palazzo tra cui le residenze delle guardie e la piccola cappella di San Marco eretta durante il dominio veneziano (Kovačić, 2011).

Tuttavia oggi il castello presenta gravi problematiche

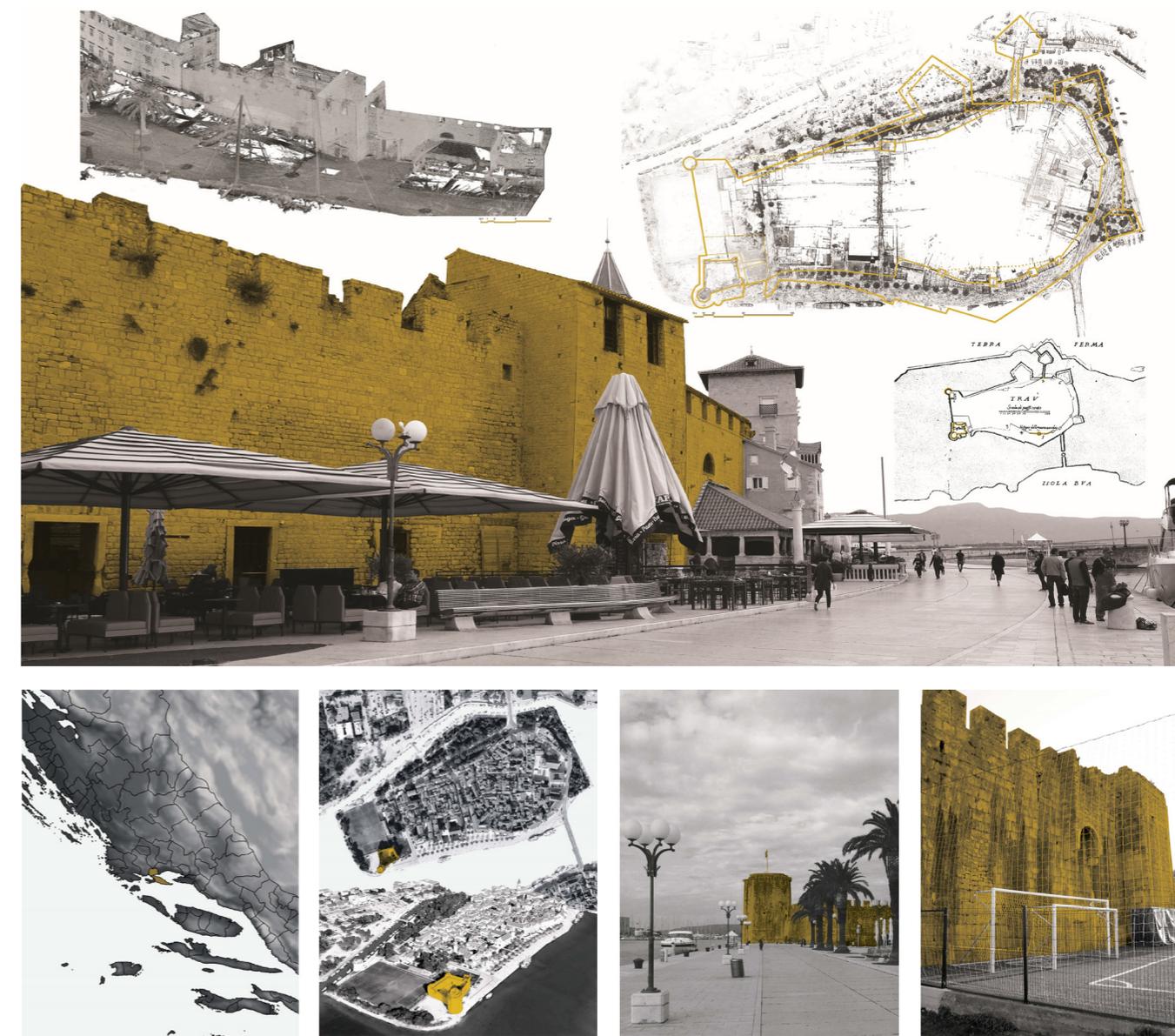


Fig. 6.20 varie viste della città di Trogir e di ciò che rimane dell'antica cinta muraria.

conservative dovute sia al degrado dei materiali originali del castello sia alla prolungata mancanza di lavori di manutenzione. Oltre a presentare numerose criticità a livello strutturale di dissesti fondali nel lato sud-est sia di tarda che di recente formazione, il castello mostra anche un quadro di degrado avanzato delle superfici esterne ed interne che interessa sia i conci lapidei che i giunti. In particolare sono presenti singolari forme di degrado legate a concrezioni bianche che prendono avvio a diverse altezze nella muratura e spesso a partire dai giunti tra i conci. Tali concrezioni di natura calcarea hanno spessore variabile e una morfologia simile a quella delle concrezioni tipo stalagmiti e stalattiti che si rinvengono in grotta. Il quadro osservato *in situ* suggerisce che traggono origine da percolazione d'acqua che muovono dall'interno della muratura verso l'esterno e laddove c'è mancanza di malta tra i conci. Il degrado a carico dei conci lapidei si manifesta sotto forme di scagliature e fessurazioni. La presenza di biodegrado delle superfici si manifesta anche con la crescita di piante infestanti ed è diffusa su varie parti delle superfici della fortezza sia nel esterno che in interno, in conseguenza della quale si hanno ingenti fenomeni di percolazione delle acque meteoriche (Fig. 6.21)

All'interno di tale scenario è stato deciso di procedere in fase preliminare ad una campagna di analisi che ha previsto un rilievo *remote sensing* che ha permesso di ottenere informazioni geo- morfometriche non solo del castello di Kamerlengo ma anche di tutto il waterfront dell'isola ed ottenere dei modelli digitali 3D che hanno svariate



Fig. 6.21 varie tipologie di degrado presenti nel castello del Kamerlengo: a) dissesti strutturali, b) concrezioni stalagmitiche della muratura, c) perdita della malta di allettamento tra i conci di pietra calcarea, d) scagliatura e fessurazione dei conci di facciata.

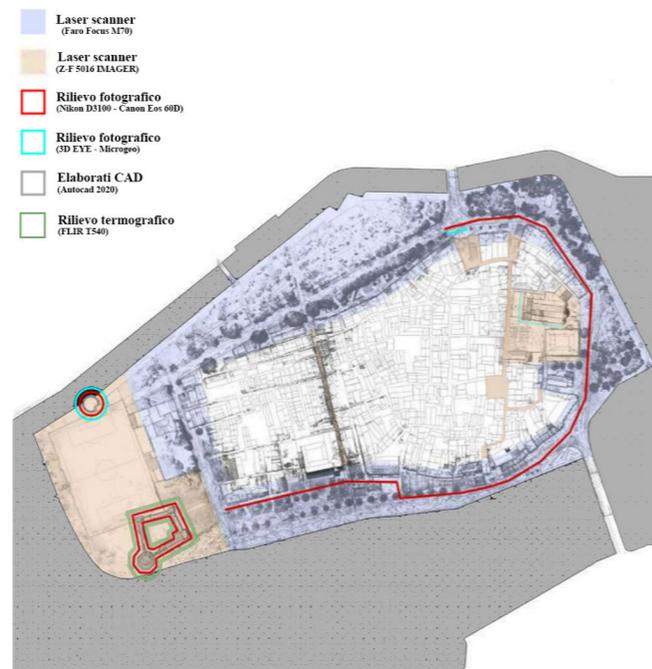


Fig. 6.22 sintesi delle metodologie di rilievo utilizzate nella città di Trogir a seguito del workshop del 2019 e del 2021.

funzionalità. Al laser scanner è stato integrato anche un rilievo fotografico terrestre con tecnica SfM per ottenere *texture* e dati colorimetrici e esaminare in un primo stadio aspetti materici e le condizioni conservative delle superfici (Fig. 6.22, 6.23), (Brizzi et al., 2023).

A queste tecniche è stata accompagnata anche la termografia nell'infrarosso termico realizzata con l'utilizzo della termocamera FLIR T540. Grazie a questa tecnica è stato possibile evidenziare i dissesti strutturali che apparivano di remota datazione e presentavano evidenze anche in corrispondenza di risarcimenti di interventi di consolidamento dovuti alle varie fasi di utilizzo della fortificazione. Con questa strumentazione è stato possibile rilevare anche infiltrazioni di acqua umidità di risalita capelli capillare e vuoti all'interno della muratura, inoltre è uno strumento utile per fornire una lettura stratigrafica dell'edificio indirizzando così ulteriori studi analitici e interventi di restauro. L'indagine in termografia infrarossa è stata eseguita in modalità passiva, ovvero senza indurre sollecitazioni termo-meccaniche dell'oggetto da rilevare. Per ogni prospetto sono state acquisite un certo numero di fotografie in modalità inizialmente *long-range* cioè posizionandosi ad una distanza dall'oggetto di circa 20 m. La modalità di acquisizione delle fotografie, compatibilmente

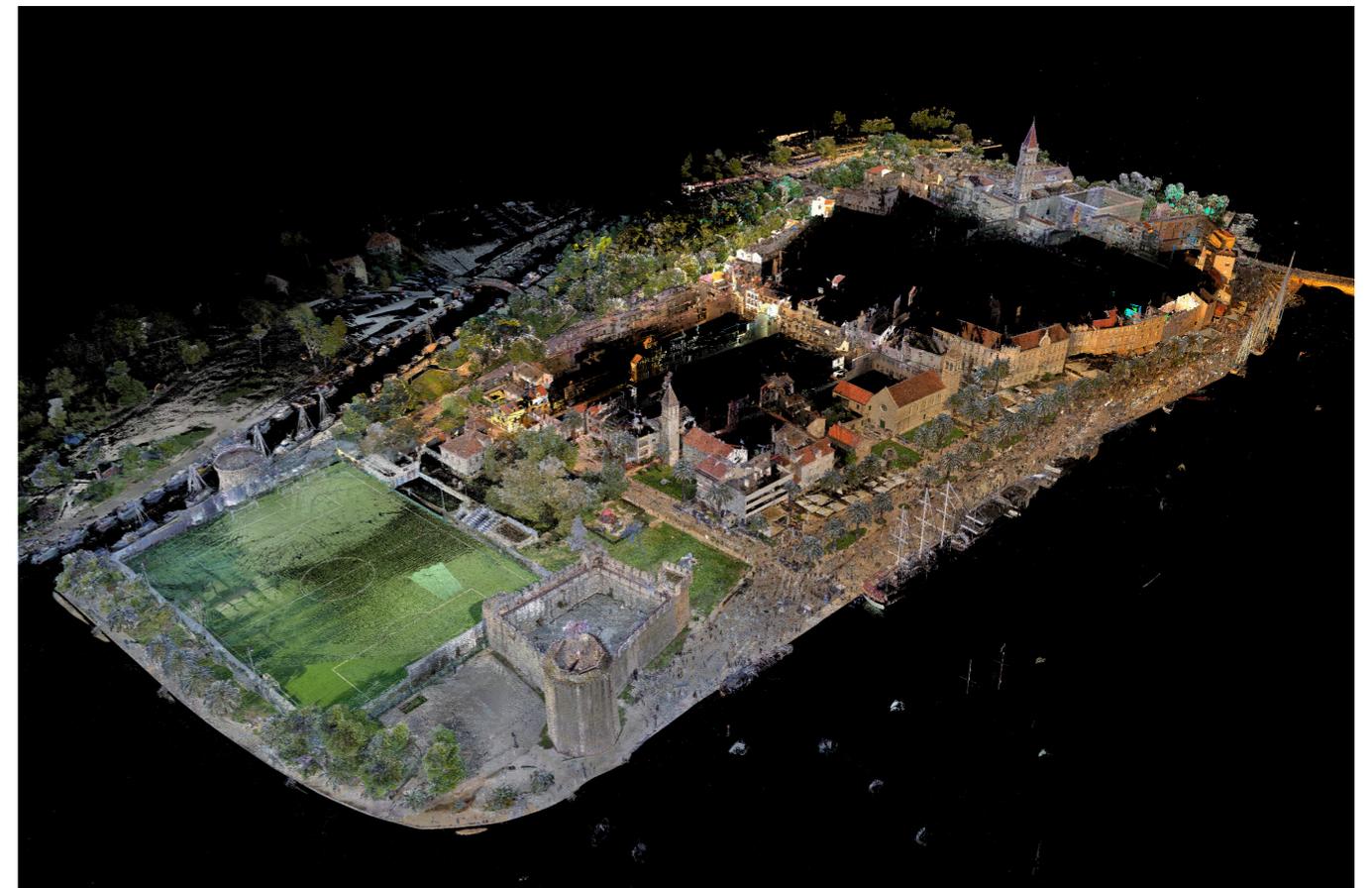


Fig. 6.23 vista della nuvola di punti laser scanner TLS.

con i casi di studio presentati precedentemente, ha seguito la metodologia che si usa per il rilievo fotogrammetrico SfM mantenendo quindi una sovrapposizione tra uno scatto e l'altro di circa 60/70%. I termogrammi IR sono elaborati con la palette di colore *'rainbow'* in cui, alla scala di temperatura minima e massima sono associati, rispettivamente, i colori blu-rosso. Le immagini IRT elaborate con i fotopiani RGB, insieme all'elaborazione grafica ottenuta dai prospetti su *Autodesk Autocad*, hanno permesso una valutazione preliminare dell'integrità strutturale e una lettura stratigrafica dell'edificio. I risultati delle immagini IR *long-range* con i rispettivi prospetti da nuvola di punti sono mostrati nelle Fig. 6.24-6.26.

Dall'osservazione degli elaborati si possono rilevare alcuni elementi come:

- Dalla combinazione delle immagini IR con l'ispezione

visiva è possibile evidenziare dissesti strutturali murari, che appaiono di datazione remota, tuttavia a Sud-Est e a Ovest sono presenti evidenze di dissesti anche in corrispondenza di interventi di ristrutturazione e consolidamento dovuti alle varie fasi di utilizzo della fortificazione;

- La presenza di fenomeni di biodegradazione, come patine biologiche o crescita di erbe infestanti, è ampiamente diffusa su varie parti della superficie del forte, sia esternamente che internamente, in particolare a livello della copertura della torre d'angolo;
- Le concrezioni sono localizzate soprattutto sulla mastio ottagonale più vicino al mare. Sono presenti forme diffuse di degrado legate a concrezioni bianche che sembrano dovute allo scorrimento dell'acqua e alla deposizione di sali disciolti. Partono dai giunti tra i conci dove la malta è

fagliata e sono di natura calcarea con spessore variabile, fino a 7 cm e fino a 4 m di lunghezza.

Il diverso utilizzo del forte ha portato ad alcune fasi costruttive che sono visibili nelle ricostruzioni termiche IR, in particolare si possono riscontrare alcune trasformazioni, quali:

- L'omogeneità termica dei camminamenti di guardia interni permette di individuare pietre di fase costruttiva più recente rispetto a quelle della muratura, infatti i camminamenti di guardia ancora nel 1922 risultavano parzialmente distrutti (Fig 6.27);
- Anche la maggior parte delle merlature del castello è stata ricostruita, come si può notare dall'omogeneità termica di queste aree in contrasto con l'ambiente circostante;
- Una cappella tamponata era presente sul lato ovest, sotto le scale (Fig. 6.26B). La presenza di questa cappella (cappella di San Marco) è documentata anche in una

foto storica, come si può vedere in Fig 6.28, dove oggi giorno se ne rileva traccia solo nello spettro infrarosso. Sul lato destro del capitolo c'è la traccia di un'antica residenza. Sullo stesso lato, sotto il camminamento di sinistra, si trova un arco presumibilmente tamponato, in corrispondenza del quale è presente anche una lesione strutturale che va dalla sommità al piano terra;

- Sul lato esterno Nord-Est (Fig. 6.29) sono visibili due forme rettangolari di circa 18 °C, una all'estremità destra al livello del piano terra, la seconda al centro della torre destra. La prima potrebbe corrispondere a una porta d'ingresso, come confermato dal lato interno Est, dove è presente una cavità muraria che potrebbe corrispondere a una porta tamponata. La seconda forma rettangolare nella torre di destra potrebbe corrispondere a un'altra apertura architettonica (forse una finestra), come illustrato in un disegno storico del XIX secolo, in cui è visibile un'apertura in corrispondenza di quel punto.

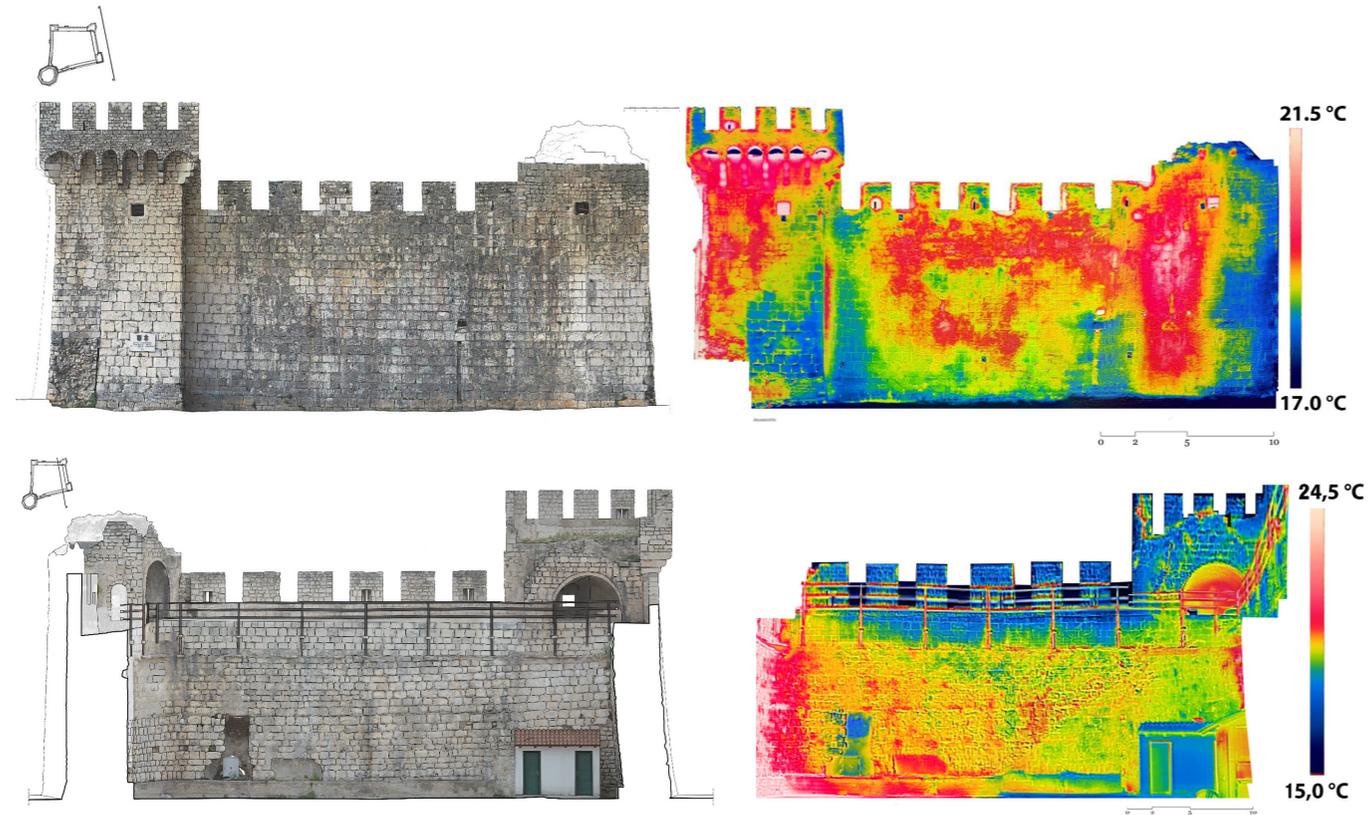


Fig. 6.24 fotopiano IR e VIS del prospetto Nord-Est esterno (sopra) e interno (sotto) del castello di Kamerlengo.

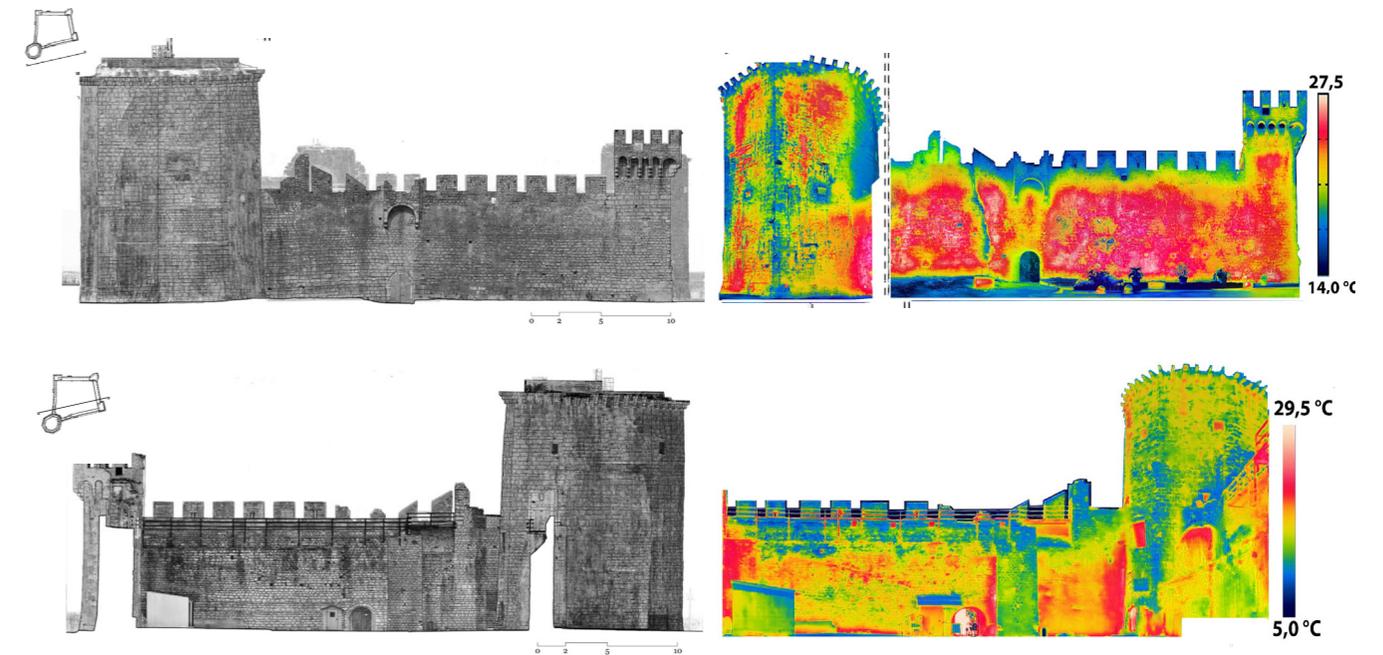


Fig. 6.25 fotopiano IR e VIS del prospetto Sud - Est esterno (sopra) e interno (sotto) del castello di Kamerlengo.

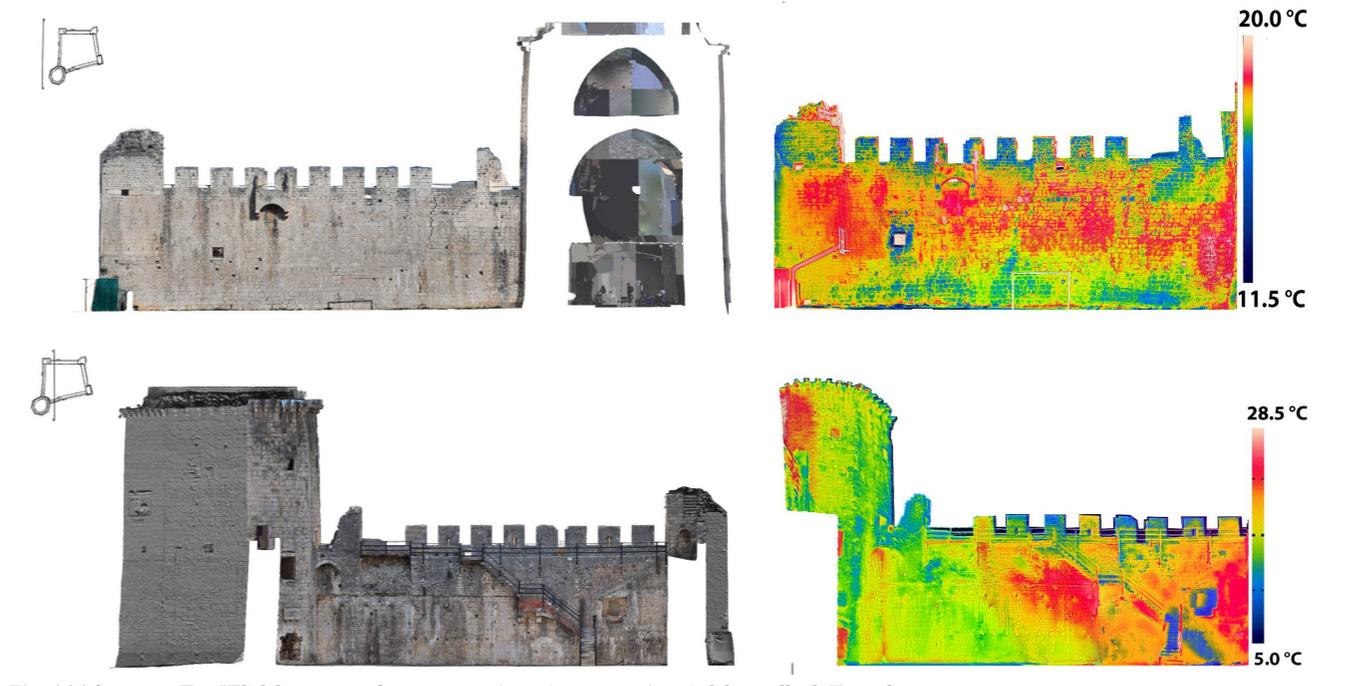


Fig. 6.26 fotopiano IR e VIS del prospetto Ovest esterno (sopra) e interno (sotto) del castello di Kamerlengo.



Fig. 6.27 foto storica del camminamento delle guardie (Archivio Istituto Luce).

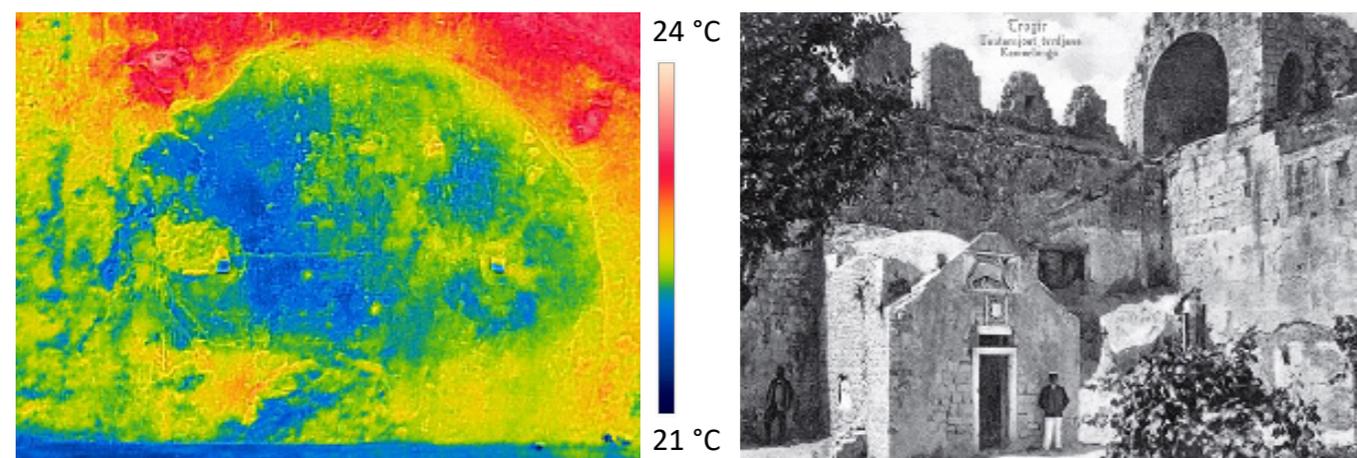


Fig. 6.28 a sinistra le tracce della cappella di San Marco dal rilievo IRT, a destra la cappella di San Marco nel 1940.

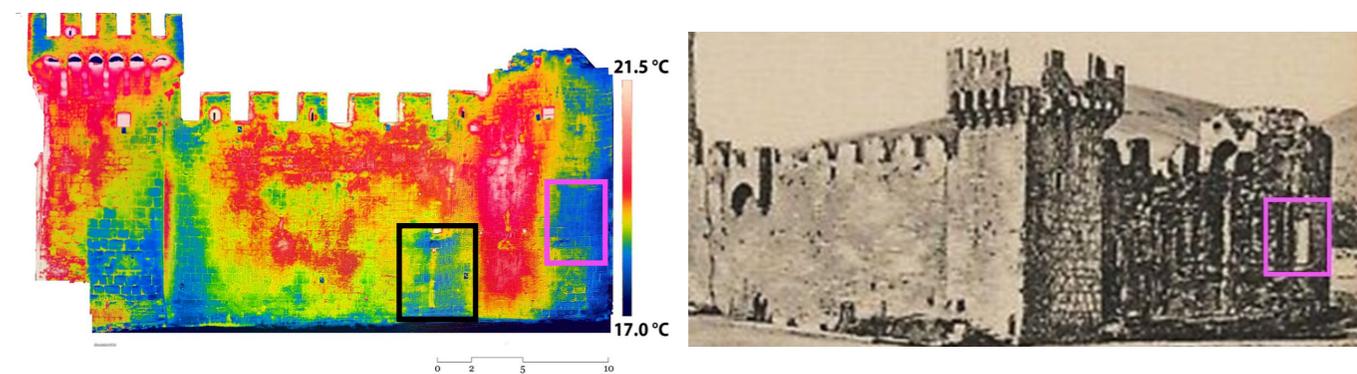


Fig. 6.29 prospetto IR Nord-Est con visibili due antiche aperture: in linea nera la porta tamponata e in linea viola la presumibile finestra che compare anche in un disegno storico del XIX secolo.

6.4 Discussione e analisi dei risultati

Il progetto di ricerca effettuato su differenti casistiche fornisce, dal punto di vista della sperimentazione dei risultati, un alto gradiente di attendibilità e scientificità del metodo, dovuto principalmente all'integrazione di differenti metodologie di riferimento e di tecnologia digitale. I differenti procedimenti messi in atto conducono ad un significativo risultato: la realizzazione del modello digitale ottenuto da un accurato rilievo digitale integrato con termografia IR ha consentito di sviluppare un processo metodologico affidabile per ottimizzare la conoscenza del Patrimonio Culturale e per guidare le successive operazioni di restauro e manutenzione che possono essere adottate sia per una corretta conservazione del sito, sia per la riduzione dei rischi e delle calamità. Inoltre, la sinergia tra le varie tecniche multi-sensore rappresenta un valore aggiunto in grado non solo di colmare eventuali lacune e carenze derivanti dai limiti applicativi degli strumenti, ma anche di valorizzare le peculiarità degli stessi.

In conclusione si può affermare che l'integrazione tra il rilievo laser scanner, la fotogrammetria SfM e la termografia IR, ha portato alla creazione di modelli 3D e fotopiano 2D con caratteristiche geometriche e distribuzioni di temperatura superficiale molto accurate. Infatti utilizzando un software di fotogrammetria per la ricostruzione di modelli 3D, le immagini IR sono state post-processate attraverso il plugin IR image di IMAGEJ che le esporta in un formato di file Tiff a 32 bit, rendendole disponibili per il processo fotogrammetrico. Questo processo evita la trasformazione dei file IR raw in altri canali o immagini pancromatiche. Come mostrato per il caso di studio di palazzo Lenzi, anche per mezzo di un unico dispositivo, ovvero la termocamera, si possono creare dei modelli 3D-IRT, sfruttando la possibilità che offre la termocamera di scattare foto anche in RGB, sebbene con risoluzione molto ridotta (348 x 464 pixels). Per colmare tale limite si suggerisce di effettuare il rilievo IR sia in modalità *long-range* che *close-range* dotandosi di un'asta telescopica su cui disporre la termocamera, in modo da acquisire inquadrature a piano verticale e il più possibile frontali.

Per verificare l'accuratezza della nuvola IR 3D ottenuta, ne sono state calcolate le differenze di distanze tra la nuvola RGB e IR, rilevando errori pari a circa 13 cm, localizzate soprattutto nelle bucatore di porte e finestre. Ovviamente questo risultato è conforme con la bassa risoluzione delle immagini RGB, che creano dei modelli metricamente e morfologicamente a bassa accuratezza. Per questo, se si intende eseguire un rilievo IR e VIS con elevato rigore metrico, si suggerisce l'integrazione

della nuvola IRT con una RGB ottenuta da macchine digitali ben calibrate. Il rilievo integrato VIS-IR tramite termocamera può comunque essere utilizzato se lo scopo della ricerca non richiede elevato rigore scientifico o se i tempi e i costi lo necessitano.

Gli ortomosaici IR ottenuti in fase finale, sia che si tratti di rilievi di piccole porzioni di parete (come gli affreschi), di facciate di palazzi storici, o di interi complessi monumentali, permettono di identificare le irregolarità termiche che, grazie all'alta risoluzione dei fotopiani termici finali, possono essere enfatizzate e stimate.

Infine, relativamente ai due casi di studio a scala monumentale, ovvero il castello del Kamerlengo nella città di Trogir in Croazia e il monastero di Sant Miquel d'Escornalbou nella provincia di Tarragona in Spagna, essi sono stati rilevati a seguito di *workshop* partenariati da CNR Italia e Università degli studi di Firenze (DIDA) o all'interno di progetti internazionali. Il protocollo metodologico ha previsto l'utilizzo di tecniche di *remote sensing* multi-risoluzione e multi-banda (rilievo termografico IR), la cui sinergia ha prodotto una serie di risultati sullo stato conservativo delle superfici interne ed esterne, contribuendo alla ricostruzione storica-evolutiva e strutturale degli edifici.

CONCLUSIONI

La tecnica dello strappo dei dipinti murali dal loro supporto originale ha rappresentato, attorno alla metà del '900, una delle principali metodologie per evitare la perdita di dipinti soggetti a processi di alterazione/degrado di varia natura: problemi strutturali, infiltrazioni di acqua, fenomeni di umidità di risalita capillare, ecc. La conservazione dei dipinti murali staccati è oggi un tema di particolare attualità a causa dei fenomeni di alterazione e degrado che iniziano ad essere evidenti sia sul supporto sia sull'affresco e spesso tra loro correlati. I supporti utilizzati per la riadesione del dipinto possono essere costituiti da diversi materiali: vetroresina, Masonite, canniccio misto a gesso con controtelai in legno, Eternit, rete metalliche e gesso. Ciascun materiale presenta peculiarità diverse, a seconda anche del luogo in cui è conservato, pertanto problematiche conservative diverse.

Per comprendere dettagliatamente come il dipinto murale e il suo supporto possa andare incontro a varie fenomenologie di degrado e alterazione, è stata eseguita, nel capitolo 1, una breve trattazione storica su come e quando ha preso avvio la prassi estrattista e cosa ha guidato i restauratori dell'epoca nella scelta dei materiali dei supporti considerati "ottimali" per la corretta conservazione del dipinto.

Nello stesso capitolo sono state poi analizzate le problematiche conservative che ad oggi sono state riscontrate nei supporti, e di cui se ne vede evidenza in vari contesti fiorentini. In particolare sono state analizzate principalmente tre tipologie di materiali utilizzate per la fabbricazione dei supporti, ovvero la Masonite, la vetroresina e la rete metallica con gesso e caseinato di calcio. L'analisi delle problematiche legate a questi materiali è stata suffragata da fonti storiche, da campagne di rilievo, da ispezioni visive *in situ* e da test sperimentali effettuati nei laboratori dell'Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (ISPC-CNR) di Firenze. Dai test di assorbimento di acqua libera (acqua di imbibizione), dai cicli di stress termo-igrometrico in camera climatica e dai test sul piano di riscontro per la verifica degli imbarcamenti, è emerso che una delle principali criticità legate alla Masonite è l'assorbimento di acqua e umidità, che provoca variazioni dimensionali molto limitate lungo i bordi del pannello, ma considerevoli lungo lo spessore (aumento di circa il 55% tra peso dopo saturazione e peso secco) e un aumento della freccia di imbarcamento di oltre il 50% tra pre- e post-saturazione. Questo comportamento meccanico è in parte attribuibile al processo di produzione, per il quale le fibre di legno si allineano più o meno casualmente lungo la

direzione di laminazione, da cui la sostanziale omogeneità di comportamento nelle due direzioni della superficie. Contrariamente, la maggiore sensibilità verso l'umidità delle fibre nella loro direzione trasversale determina la maggiore variabilità delle dimensioni nella direzione perpendicolare alla superficie, ovvero nello spessore dei pannelli. Anche nel caso della rete metallica e gesso (supporto di Domenico Fiscali) e della vetroresina, l'umidità provoca modificazioni nell'aspetto e nelle caratteristiche chimico-fisiche, oltre che meccaniche, dei supporti. Gli ambienti potenzialmente aggressivi per questi materiali sono stati correlati a:

i) esposizione agli agenti atmosferici in ambienti caldo-umidi e radiazioni UV;

ii) escursione termica elevata;

iii) esposizione agli agenti atmosferici in climi freddi (cicli di gelo e disgelo);

iv) alto contenuto di umidità nel substrato (umidità di risalita), con possibile alta concentrazione di sali.

Le problematiche riscontrate su questa tipologia di supporti non sono dunque ascrivibili solamente al materiale stesso, ma anche alla combinazione di materiali diversi che, avendo comportamenti differenti, determinano sollecitazioni meccaniche che concorrono a rendere i supporti vulnerabili, soprattutto quando si trovano inseriti in contesti ambientali non favorevoli ad una loro corretta conservazione.

In tale scenario si inseriscono le problematiche conservative del ciclo di affreschi in monocromo conservati presso il chiostro Verde di Santa Maria Novella (Firenze) e trattate nel capitolo 2. Oggi il chiostro fa parte del Museo di Santa Maria Novella, uno dei musei civici della città. Dal chiostro Verde, vero cuore del complesso, si accede al Cappellone degli Spagnoli, al chiostro dei Morti ed al chiostro Grande. Il chiostro venne affrescato con pitture in terra verde, da cui il nome, da Paolo Uccello e altri pittori quali Dello Delli tra il 1425-1430. Nella seconda metà del Novecento gli affreschi furono tutti staccati e ricollocati su varie tipologie di supporti tra cui Masonite, vetroresina e rete metallica. I dipinti murali vennero ricollocati in sede solamente nel 1983, anche se per alcune lunette i restauri procedono tutt'oggi. Quello che si nota oggi giorno è l'avanzamento delle problematiche conservative legate ai supporti: le escursioni termiche giornaliere e stagionali, i fenomeni di condensa superficiali (riscontrati da rilievi termo-igrometrici effettuati nel 2005

e 2015 dai quali sono emersi fenomeni di condensa nella stagione autunnale), se non addirittura la presenza di acqua libera causata da infiltrazioni e fenomeni di risalita capillare nella muratura, hanno determinato deformazioni meccaniche, formazione di cricche e contaminazioni biologiche sui supporti. A causa delle dilatazioni termiche, della perdita di coesione della malta di allettamento e la perdita di funzionalità delle viti di fissaggio alla muratura, gli ancoraggi hanno ceduto e si sono verificati imbarcamenti dei supporti con deformazioni localizzate.

Alla luce di tale problematiche, partendo da alcune esperienze nel settore dell'architettura riguardanti l'utilizzo dei vari sistemi di rilievo digitale su superfici dipinte e dai principi stabiliti dall'ICCROM riguardo la conservazione preventiva e gestione del rischio (*ABC Method, 2016*), l'impiego di metodologie non invasive e non distruttive appropriate, con particolare riferimento alle tecnologie digitali (quali il rilievo *laser 3D long e close-range*, la fotogrammetria *SfM*, il rilievo topografico e quello nell'infrarosso termico) sono risultati quali tecniche imprescindibili per l'integrazione sulle analisi dello stato di conservazione degli affreschi e la definizione di un protocollo analitico di riferimento. Tali metodologie sono state selezionate a seconda dei vari obiettivi e della loro interoperabilità, considerando inoltre la scala di restituzione, le dimensioni dell'oggetto da rilevare, l'accuratezza richiesta e la fattibilità delle misure *in situ*.

Le metodologie di rilievo integrato selezionate costituiscono un valido supporto per una corretta programmazione delle attività atte a identificare e analizzare gli aspetti legati alla conservazione e all'integrità strutturale dei dipinti murali staccati, incluse le risorse per rispondere agli aspetti emergenziali e/o di urgenza. Il monitoraggio periodico degli affreschi ha infatti permesso di:

i) studiare e analizzare i movimenti millimetrici e sub-millimetrici che affliggono i sistemi supporti-affreschi staccati in relazione alle diverse condizioni microclimatiche presenti nel chiostro durante i cambiamenti stagionali;

ii) valutare i rischi, le cause ed effetti in base alle diverse tipologie di supporto;

iii) offrire alle Pubbliche Amministrazione e agli Enti preposti per la tutela del Patrimonio Culturale uno strumento di supporto decisionale, nella forma di un sistema di

monitoraggio che consenta al responsabile del singolo bene di poter attivare le necessarie procedure operative e gli interventi conservativi necessari a salvaguardarli.

In tale contesto, la redazione semi-automatica di schede di catalogazione, strutturate intorno a varie macro-aree specifiche, si dimostra come un valido strumento per la gestione, l'analisi dei dati ed il loro futuro utilizzo. Nell'ambito della ricerca si è infatti manifestata l'esigenza di mettere a punto un sistema informativo univoco e interconnesso che permettesse sia di gestire simultaneamente la globalità dei dati acquisiti, sia di divenire la base conoscitiva per lo sviluppo della sua rappresentazione tridimensionale. A tal fine, lo strumento più funzionale per combinare le diverse tipologie di informazioni acquisite è stato individuato nella schedatura elaborata mediante il software *FileMaker Pro*, la cui predisposta struttura ha permesso una compilazione semiautomatica, ed eseguibile in più fasi, dei dati relativi a tutti gli affreschi oggetto di studio.

L'approccio diagnostico proposto si è dimostrato un efficace protocollo operativo per la determinazione dell'integrità strutturale dei dipinti murali e dei supporti e il loro monitoraggio nel tempo, come si evince dai risultati ottenuti nel corso della campagna *in situ*. Tramite la sinergia delle tecniche selezionate è stato possibile rilevare la presenza di diversi tipi di difetti, come rigonfiamenti, imbarcamenti, distacchi e grazie al controllo periodo, è stato possibile comprendere anche le condizioni alle quali si innescano determinati fenomeni. In particolare il rilievo effettuato nel periodo estivo e quello invernale hanno messo in luce fenomeni di dilatazione e contrazione dei supporti di notevole entità: se nella stagione calda i supporti mantengono una relativa planarità della superficie, quando la temperatura scende i supporti subiscono delle contrazioni che si manifestano in imbarcamenti e deformazioni localizzati che raggiungono un massimo di 4.5 cm e un minimo di 2.5 cm rispetto al piano di riferimento. In questo caso i modelli digitali di elevazione (DEM) risultano un valido supporto non solo per il monitoraggio e la quantificazione dei movimenti fisiologici subiti dai supporti, ma anche per l'identificazione non distruttiva e senza contatto dei singoli pannelli che li costituiscono.

Considerando i supporti nel loro complesso è stato osservato che, le aree più vulnerabili, dove si concentrano quindi le maggiori deformazioni, sono quelle ai margini e all'interfaccia tra i diversi pannelli tergal di Masonite. Grazie

al rilievo infrarosso termico è stato possibile identificare anche le disconnessioni e la mancanza di giunture tra i diversi telai della masonite: tali punti critici contribuiscono alla formazione di stress meccanici nocivi per la pellicola pittorica.

Alla luce dei risultati ottenuti dal protocollo metodologico è merso inoltre che lo stato conservativo più critico è stato rilevato per gli affreschi conservati nel lato Ovest del chiostro che, grazie a foto e fonti storiche, sappiamo essere stato quello più soggetto a rifacimenti e modifiche strutturali. Anche gli affreschi conservati in interno, pur restaurati circa dieci anni fa, mostrano deformazioni plastiche permanenti causate dai vecchi telai lignei utilizzati negli anni 60 del Novecento e che hanno compromesso irrimediabilmente la pellicola pittorica. L'utilizzo del laser *close-range* ad alta risoluzione ha mostrato che in alcune aree si sono sviluppati e si stanno formando dei cretti e rigonfiamenti dello strato superficiale pittorico che, in alcuni casi, hanno già prodotto la perdita di colore originale.

Le informazioni ottenute dalle singole tecniche offrono dunque una chiara interpretazione e correlazione dei risultati, permettendo di comprendere l'integrità strutturale della pittura murale e del suo supporto, identificandone le aree con difetti (distacchi, rigonfiamenti, incurvamenti) e valutandone i rischi associati.

Nel capitolo 4 viene inoltre affrontata l'emergente sfida riguardante l'integrazione 3D di tecniche di *imaging* scientifico in contesti multimodali (ad esempio multi-sensori, multi-dimensioni e multi-spettrali). Per decenni infatti gli oggetti del Patrimonio Culturale sono stati documentati con la fotografia tecnica (TP), che fornisce dati preziosi per comprendere o recuperare informazioni sui dipinti e la loro storia. Più di recente si è assistito a una crescente richiesta di utilizzo di tecniche di rilievo digitale al fine di ottenere, tra i possibili risultati, modelli 3D e ortofotomosaici in grado di offrire la possibilità di quantificare metricamente i risultati derivati dalle varie tecniche di *imaging* multi-spettrale, con tutte le conseguenti osservazioni che ne derivano.

L'integrazione delle tecniche e la loro interoperabilità ha trovato conferma anche nella possibilità di creare, dal rilievo fotogrammetrico VIS e dal rilievo termografico IR, dei modelli 3D geo-morfometrici e radiometrici (X, Y, Z, T). Dopo una revisione sullo stato dell'arte delle metodologie utilizzate ad oggi per l'integrazione dei modelli IR con quelli VIS, nel presente lavoro di tesi viene mostrata la possibilità

di post-produrre i singoli termogrammi usciti dalla termocamera attraverso il software *open-source* (ImageJ), in grado di convertire le immagini IRT in immagini TIF 32 bit a banda singola, estrarre i dati *raw* e calcolare la distribuzione della temperatura assoluta ri-emessa dall'oggetto sotto esame. Le immagini IR ottenute sono così direttamente disponibili per l'elaborazione con un *software* di analisi fotogrammetrica (*Agisoft Metashape, 3DF Zephyr*) e per la realizzazione di modelli IRT-3D. Per verificare l'accuratezza geo-morfometrica dei modelli 3D-IRT creati con tale flusso di lavoro, le nuvole IRT possono essere integrate e co-registrate con nuvole di punti RGB create da fotocamera digitale. I modelli 3D termici e fotogrammetrici integrati sono una tecnica che combina dunque le immagini termiche e ottiche per creare una rappresentazione tridimensionale di un edificio o di un oggetto con informazioni accurate sulla morfologia e sulla temperatura. La co-registrazione della nuvola IRT e RGB avviene tramite l'applicazione di algoritmi di *computer vision* e fotogrammetria per ricostruire la geometria e la *texture* termica del soggetto. In questa fase è essenziale il corretto posizionamento dei *Ground Control Points*. Come mostrato nel Capitolo 3 e 4 l'identificazione dei *target* tra i diversi rilievi VIS e IR è infatti un aspetto cruciale per il corretto allineamento e geo-referenziazione dei modelli multi-scala. Tali operazioni sono state rese possibili tramite l'utilizzo di *target* con quadranti di alluminio satinato, riconoscibili in termografia IR, fotogrammetria RGB e laser scanner, a condizione di alcuni requisiti di acquisizione dei dati (scansioni ravvicinate e ortogonali al target, per quanto possibile). La valutazione finale per la verifica della corretta generazione e co-registrazione delle nuvole VIS e IR e la stima della loro confidenza spaziale e geometrica, è avvenuta importando le nuvole nel software *Cloud Compare* e sottoponendole all'analisi delle distanze residue, effettuate attraverso lo strumento "*Compute Cloud-/cloud distance*". Esse hanno mostrato differenze nelle distanze medie sempre inferiore al cm per ogni affresco analizzato. Per compensare questi errori medi che possono verificarsi tra nuvole IRT e RGB, è stato dimostrato che è comunque possibile ottenere un dato più accurato trasferendo le informazioni relative alla temperatura delle nuvole di punti IRT alla nuvola di punti RGB di riferimento ad alta risoluzione basandosi sulla distanza euclidea tra le due nuvole di punti. Questa operazione permette di unire i campi scalari della temperatura delle nuvole di punti IRT alla nuvola di punti ottica ad alta densità e garantire un elevato livello di dettaglio geometrico e di confidenza geospaziale. Sulla base di tali nuvole interpolate,

o a partire da quelle IRT "originali" è poi possibile generare gli ortomosaici aventi una risoluzione del mm/pix.

Nell'ultimo capitolo verranno mostrate le potenzialità e i limiti offerte dal protocollo metodologico proposto su vari casi di studio, nazionali e internazionali. L'obiettivo è quello di validare il protocollo anche su diverse scale architettoniche, partendo dal rilievo di oggetti a scala media (affreschi), fino a quello a larga scala, come le facciate di edifici storici (palazzo Lenzi in piazza Ognissanti a Firenze), castelli di antiche fortificazione (castello del Kamerlengo nella città di Trogir in Croazia) o interi complessi monastici (monastero di Sant Miquel d'Escornalbou nella provincia di Tarragona in Spagna).

Nel primo caso di studio, ovvero quello del palazzo Lenzi decorato a graffito nel Rinascimento, il rilievo RGB e IR è stato effettuato solamente tramite l'ausilio della termocamera, ottimizzando tempi e costi. Il palazzo ha una storia evolutiva-costruttiva alquanto complessa tanto da aver valso al palazzo il soprannome di "palazzo degli enigmi". L'obiettivo del rilievo era dunque ottenere informazioni circa lo stato conservativo delle facciate, ma anche trovare elementi nascosti, modifiche storiche e anomalie termiche in grado di fornire informazioni storiche e stratigrafiche. In questo caso il rilievo ha sfruttato il doppio sensore della termocamera, il microbolometro raffreddato per l'IR e un sensore CCD per il VIS. Purtroppo nel caso delle immagini RGB da termocamera un forte limite è rappresentato dalla loro scarsa risoluzione (348 x 464 pixels), ovvero la stessa dei termogrammi e dal FOV molto ristretto (24°), per cui si necessita di molti scatti per ricoprire vaste aree a distanze ravvicinate. Per compensare tale criticità e ottenere comunque una buona qualità metrica degli elaborati finali il rilievo è stato effettuato disponendo la termocamera su un'asta telescopica in modo da acquisire inquadrature a piano verticale e il più possibile frontali. La nuvola IR risultante dal *workflow* proposto in tesi ha permesso di ottenere un modello a nuvola di punti con una densità di 0.2 points/cm² ed ortomosaico IR con una risoluzione finale di 2,62 cm/pix, mentre la distanza media delle distanze tra la nuvola di riferimento SfM VIS e la nuvola di punti IR è di -0,13 m (dev. std. =0,43 m). Si può dunque concludere che l'integrazione del modello RGB generato da termocamera offre un supporto geo-spaziale al rilievo IR, in grado di sfruttare anche la stessa posizione del punto di scatto delle immagini trattandosi dello stesso strumento, ma non offre lo stesso livello di rigore metrico e morfologico che permette

invece di ottenere il rilievo SfM sviluppato da fotocamera digitale.

Infine lo stesso flusso di lavoro è stato applicato a altri due casi di studio a scala monumentale, ovvero il castello del Kamerlengo nella città di Trogir in Croazia e il monastero di Sant Miquel d'Escornalbou nella provincia di Tarragona in Spagna, rilevati a seguito di workshop partenariati da CNR Italia e Università degli studi di Firenze (DIDA) o all'interno di progetti internazionali. Il protocollo metodologico ha previsto l'utilizzo di tecniche di *remote sensing* multi-risoluzione e multi-banda (rilievo termografico IR), la cui sinergia ha prodotto una serie di risultati sullo stato conservativo delle superfici interne ed esterne, contribuendo anche alla ricostruzione storica-evolutiva e strutturale degli edifici.

In conclusione si può sostenere che la fusione di immagini IRT con modelli parametrici 3D rappresenta un'evoluzione significativa dell'IRT-3D, riconoscendo, tra le possibili applicazioni future, anche la creazione di elementi pronti per il BIM che offrono così l'opportunità di monitorare e gestire in modo completo il Patrimonio Architettonico. Inoltre, la possibile combinazione di mappatura di disegni storici, piani CAD, mappe T-BIM, immagini GPR e ortomosaici IRT rappresenta un importante strumento per scopi diagnostici, energetici, archeologici o ambientali, aprendo le strade a innumerevoli implicazioni.

Il protocollo metodologico definito nel presente elaborato di dottorato potrà infine essere applicato in altri contesti che presentano dipinti murali con problematiche analoghe a quelle riscontrate nel chiostro Verde. Ampliando la casistica l'utilizzo della schedatura proposto in tesi potrà permettere la creazione di un database QGIS per la gestione libera e semi-automatica dei dati relativi ad ogni caso di studio, intrecciando così le esigenze di conservazione, valorizzazione e fruizione del Patrimonio Culturale.

BIBLIOGRAFIA

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Adamopoulos, E., C. Colombero, C. Comina, F. Rinaudo, M. Volinia, M. Giroto, e L. Ardissono. 2021. «Integrating multiband photogrammetry, scanning, and GPR for built heritage surveys: the façades of Castello del Valentino». *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 8: 1–8.

Adamopoulos, Efstathios, e Fulvio Rinaudo. 2021. «Close-range sensing and data fusion for built heritage inspection and monitoring—a review». *Remote Sensing* 13 (19): 3936.

Adamopoulos, Efstathios, Monica Volinia, Mario Giroto, e Fulvio Rinaudo. 2020. «Three-Dimensional Thermal Mapping from IRT Images for Rapid Architectural Heritage NDT». *Buildings* 10 (ottobre): 187. <https://doi.org/10.3390/buildings10100187>.

Adán, Antonio, Víctor Pérez, José-Luis Vivancos, Carolina Aparicio-Fernández, e Samuel A. Prieto. 2021. «Proposing 3D thermal technology for heritage building energy monitoring». *Remote Sensing* 13 (8): 1537.

Adán, Antonio, Blanca Quintana, Juan Garcia Aguilar, Víctor Pérez, e Francisco Javier Castilla. 2020. «Towards the use of 3D thermal models in constructions». *Sustainability* 12 (20): 8521.

Alba, Mario. 2023. «SVILUPPO DI UN METODO PER IL MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DI PARETI IN ROCCIA CON LASER SCANNING TERRESTRE»

Alba, Mario Ivan, Luigi Barazzetti, Marco Scaioni, Elisabetta Rosina, e Mattia Previtali. 2011. «Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings». *Remote Sensing* 3 (9): 1847–70.

Alinari S., laurea triennale in Scienze dell'architettura (L-17) con tesi dal titolo: "Indagini conoscitive funzionali alla conservazione del Castell Monestir de Sant miquel de Escornalbou in Tarragona, Spagna". Relatore: S. Bertocci, Correlatori: F. Cioli, S.Brizzi.

Amoroso G, (2002), Trattato di scienza della conservazione dei monumenti, Elinea Editore.

Aveta, Aldo. 2011. «Potenzialità e prospettive delle tecnologie avanzate di rilevamento per la conservazione dell'architettura storica.» <https://core.ac.uk/download/pdf/11919030.pdf>.

Aterini, B., & Giuricin, S.,2020. The integrated survey for the recovery of the former hospital/monastery of San Pietro in Luco di Mugello. *SCIRES-IT-SCIENTIFIC RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGY*, 10(2), 99-116.

Balaras, C.A., e A.A. Argiriou. 2002. «Infrared Thermography for Building Diagnostics». *Energy and Buildings* 34 (2): 171–83. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00105-0).

Bandini, Fabrizio, Alberto Felici, Cecilia Frosinini, e Andrea Vigna. 2012. «Lo stato di avanzamento dei lavori nel restauro dei dipinti murali del lato orientale del Chiostro Verde di Santa Maria Novella a Firenze». *OPD Restauro*, fasc. 24: 299–300.

Bandini, Fabrizio, Alberto Felici, Paola Ilaria Mariotti, Roberto Olmi, e Cristiano Riminesi. 2008. «I dipinti murali della Loggetta dell'Allori a Palazzo Pitti: una sperimentazione per l'estrazione dei sali e per il monitoraggio con dielettrometria a microonde». *OPD Restauro*, fasc. 20: 121–30.

Becerik-Gerber, Burcin, Farrokh Jazizadeh, Geoffrey Kavulya, e Gulben Calis. 2011. «Assessment of target types and layouts in 3D laser scanning for registration accuracy». *Automation in Construction* 20 (5): 649–58. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.12.008>.

Belloul N., Hamadache H, Benyahia A., Aïcha Serier(2015), Effect of the Aggressive Environment on the Damage of a Glass Polyester Composite Developed by Hand Layup Process, Laboratory of Coating, Materials and Environment (LRME), UniversityM'Hamed Bougara of Boumerdes, 35000 Boumerdes, Algeria

Benassai P., Ciatti M., DE MARCHI A., Gnoni Mavarelli C., e Lapi Ballerini I.. 2014. «Officina Pratese. Tecnica, stile, storia». <https://flore.unifi.it/handle/2158/957787>.

Bertocci, Stefano, Federico Cioli, e Anastasia Cottini. 2020. «Paesaggi francescani: rilievo digitale e documentazione dell'Eremo delle Carceri ad Assisi, Umbria». In *Restauro: temi contemporanei per un confronto dialettico*, 698–707. Didapress. <https://flore.unifi.it/handle/2158/1235479>.

Bertocci, S. (2019), La documentazione del centro storico

di Trogir. Un processo di analisi per la conoscenza di siti UNESCO, in Parrinello, S., Picchio, F. (a cura di), *Dalmazia e Montenegro. Le fortificazioni Venete nel Bacino del Mediterraneo Orientale. Procedure per la conoscenza e la Documentazione Digitale del Patrimonio Storico Fortificato*, Pavia University Press, Pavia, IT, pp. 39-48

Bertocci, S., Pivetta, M., Ricciarini, M., Bordini, E., Cioli, F., Cottini, A., ... & Marasovic, K. (2019). Trogir, memoria ed innovazione. rilievo, conservazione e valorizzazione attraverso l'indagine scientifica. Trogir, memory and innovation. survey, conservation and valorizzazione through scientific analyses. In *Il Simposio UID di internazionalizzazione della ricerca Patrimoni culturali, Architettura, Paesaggio e Design tra ricerca e sperimentazione didattica* (pp. 184-187). DIDAPress.

Bocchi-Cinelli (1677) Le bellezze della città di Firenze, dove a pieno di pittura, di scultura, di sacri templi, di palazzi, i più notabili artifizii, e più preziosi si contengono, scritte già da M. Francesco Bocchi, ed ora da M. Giovanni Cinelli ampliate, ed accresciute, Firenze, per Gio. Gugliantini;

Bodnar, J. L., J. C. Candoré, J. L. Nicolas, G. Szatanik, V. Detalle, e J. M. Vallet. 2012. «Stimulated infrared thermography applied to help restoring mural paintings». *NDT & E International* 49 (luglio): 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.03.007>.

Boehm, R. M. (1930). *The Masonite Process*. *Industrial & Engineering Chemistry*, 22(5), 493-497.

Botticelli G. (2010), *Metodologia di restauro delle pitture murali*, Centro Di Edizioni, Firenze, p. 99.

Brandi, C., (1950a) “Il fondamento teorico del restauro”, *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro* (1): 5-12

Brandi, C., (1951). Sui supporti rigidi per il trasporto degli affreschi. *Bollettino dell'Istituto Centrale del Restauro*, 5, 15-17.

Brandi C., (2000), *Teoria del Restauro*, Einaudi, pp. 9-12

Brizzi S., Cantisani E, e Riminesi C. 2022. «IRT Survey of Historic Building Façades for Focusing the Diagnostic Analysis». In *The Future of Heritage Science and Technologies*, a cura di Rocco Furferi, Rodorico Giorgi, Kate Seymour, e Anna Pelagotti, 293–307. *Advanced Structured Materials*. Cham:

Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15676-2_20.

Brizzi S., Cottini A., Manganelli Del Fà R., Felici A., Bertocci S., e Riminesi C., 2022. «Survey of the State of Conservation of Detached Wall Paintings by Digital and IR Techniques. The Case Study of Verde Cloister in the Church of Santa Maria Novella, Firenze». In *The Future of Heritage Science and Technologies: ICT and Digital Heritage*, a cura di Rocco Furferi, Lapo Governi, Yary Volpe, Kate Seymour, Anna Pelagotti, e Francesco Gherardini, 1645:82–93. *Communications in Computer and Information Science*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20302-2_7.

Brizzi S., Felici A., Salvadori B., Riminesi C., (2023) Valutazione delle deformazioni dei supporti di affreschi strappati mediante tecniche speditive e soluzioni di ancoraggio in , STRAPPI E NUOVI RITROVAMENTI. Proposta per un approccio interdisciplinare di monitoraggio dei dipinti murali strappati. I contenuti degli ultimi numeri di kermes, 75. ISBN: 9788832029239

Brizzi, S., Ricciarini, M., Bertocci, S., & Riminesi, C. (2023). Studio preliminare sul complesso fortificato di Trogir (Croazia) basato su un approccio multi-disciplinare. Studio preliminare sul complesso fortificato di Trogir (Croazia) basato su un approccio multi-disciplinare, 1005-1012.

Bruno, N., Mikolajewska, S., Roncella, R., & Zerbi, A., 2022. Integrated processing of photogrammetric and laser scanning data for frescoes restoration. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 105-112.

Bulfone Gransinigh F., (2020). Le fortificazioni dell'isola di Traù in Dalmazia. Valore simbolico e appartenenza culturale, *EcoWebTown Journal of Sustainable Design Rivista semestrale on line | Online Six-monthly Journal*.

Cabezos-Bernal, P., Pablo Rodriguez-Navarro, e Teresa Gil-Piqueras. 2021. «DOCUMENTING PAINTINGS USING GIGAPIXEL SFM PHOTOGRAMMETRY». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVI-M-1-2021* (agosto): 93–100. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-93-2021>.

Cabrelles, Miriam, Sergio Galcerá, Santiago Navarro, José Luis Lerma, Talal Akasheh, e Naif Haddad. 2009. «Integration of 3D laser scanning, photogrammetry and thermography to record architectural monuments». In Proceedings of the 22nd CIPA Symposium, Kyoto, Japan, 11–15. https://www.academia.edu/download/49818505/INTEGRATION_OF_3D_LASER_SCANNING_PHOTOGR20161023-13909-ojehon.pdf.

Cadelano, G., P. Bison, A. Bortolin, G. Ferrarini, F. Peron, M. Giroto, e M. Volinia. 2015. «Monitoring of historical frescoes by timed infrared imaging analysis». *Opto-Electronics Review* 23 (1). <https://doi.org/10.1515/oere-2015-0012>.

Calmanti M., (a. a. 2015/2016) Proposte innovative per la conservazione di un dipinto murale strappato applicato su un supporto in Masonite. Un caso applicativo: la Crocefissione e i Santi Domenico e Tommaso d'Aquino in umiltà nel Chiostro Verde di Santa Maria Novella, tesi di laurea Magistrale a ciclo unico, Opificio delle Pietre Dure di Firenze.

Calmanti M., Felici A., Manganelli Del Fà R., Pizzo B., e Riminesi C., (2019). «La conservazione di dipinti murali strappati applicati su Masonite: Il caso applicativo della Crocefissione e santi nel Chiostro Verde di Santa Maria Novella». *Kermes: la rivista del restauro*, fasc. 116: 50–54.

Centaurio, G. A. (2012). Piero Sanpaolesi. Documentare per tutelare, ricercare per restaurare. In Piero Sanpaolesi. *Restauro e Metodo* (pp. 223-236). Nardini.

Ceruleo, L., 2021. «Il Picco di Circe»: Layers. *Archeologia Territorio Contesti*, luglio, 1–20. <https://doi.org/10.13125/2532-0289/4612>.

Ciatti M., Il distacco delle pitture murali a Firenze: un breve excursus storico e metodologico, in L.Ciancabilla, *L'incanto dell'affresco: capolavori strappati, da Pompei a Giotto da Correggio a Tiepolo*, Vol.2, Silvana Editoriale S.p.A., Milano, 2014, pp 83-94.

Ciatti, M., & Martusciello, F. (2009). *Appunti per un manuale di storia e di teoria del restauro: dispense per gli studenti*, Edifir.

Ciancabilla, L. (2022). Il mega-museo degli affreschi staccati di Firenze: genesi e riflessi di un progetto mai realizzato/ The mega-museum of detached frescoes in Florence: genesis and reflections of a project never realized. *IL CAPITALE*

CULTURALE. *Studies on the Value of Cultural Heritage*, (25), 541-564.

Ciancabilla L., (2009), *Stacchi e strappi di affreschi tra Settecento e Ottocento*, Firenze.

Ciccione B., Boddi R., Felici A., Olmi R., Priori S., Riminesi C., Vigna A. «RILEVAMENTI TERMO IGROMETRICI IN SITU MEDIANTE SPETTROSCOPIA DIELETTICA A MICROONDE SUI DIPINTI MURALI DI DUE CHIOSTRI FIORENTINI: IL CHIOSTRO DI SANT'ANTONINO DI SAN MARCO E IL CHIOSTRO VERDE DI SANTA MARIA NOVELLA». *Monitoraggio del patrimonio monumentale e conservazione programmata*, a cura di Poaola Croveri e Oscar Chiantore. Torino, 25 Novembre 2005

Cicognara L., (1825), *Del distacco delle pitture a fresco*, in *Antologia*, XVIII 53, p. 10

Cocchi, Linda, Bertrand Marcon, Paola Mazzanti, Luca Uzielli, Ciro Castelli, e Andrea Santacesaria. 2014. «Verifica del funzionamento di una traversatura elastica applicata su un dipinto su tavola: la Deposizione dalla Croce di Anonimo abruzzese, XVI secolo». *OPD Restauro*, fasc. 26: 83–94.

Colucci, Silvia. s.d. «Il Chiostro Verde in Santa Maria Novella. Appunti sulla storia della costruzione e della decorazione». *Il restauro delle pitture murali di Paolo Uccello del Chiostro Verde*.

Conte, Paolo, Valentina A. Girelli, e Emanuele Mandanici. 2018. «Structure from Motion for aerial thermal imagery at city scale: Pre-processing, camera calibration, accuracy assessment». *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 146: 320–33.

Costa E., 2019. «Tecniche di rilievo digitale per la documentazione, lo studio e la fruizione di imbarcazioni lignee». <http://dspace.unive.it/handle/10579/14984>.

Costanzo, A., Minasi M., Casula G., Musacchio M., e Buongiorno M.F., 2014. «Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building». *Sensors* 15 (1): 194–213.

Costanzo, A., Minasi, M., Casula, G., Musacchio, M., & Buongiorno, M. F. (2014). *Combined use of terrestrial laser*

scanning and IR thermography applied to a historical building. *Sensors*, 15(1), 194-213

Cottini, Anastasia. 2023. «Metodologie per la gestione di strumenti digitali georeferenziati per il Cultural Heritage. Il caso-studio dei conventi dell'Osservanza Francescana in Umbria». <https://flore.unifi.it/handle/2158/1315651>.

Dabetwar, Shweta, Nitin Nagesh Kulkarni, Marco Angelosanti, Christopher Niezrecki, e Alessandro Sabato. 2022. «Sensitivity analysis of unmanned aerial vehicle-borne 3D point cloud reconstruction from infrared images». *Journal of Building Engineering* 58 (ottobre): 105070. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105070>.

De Marco, R., e S. Parrinello. 2021. «MANAGEMENT OF MESH FEATURES IN 3D REALITY-BASED POLYGONAL MODELS TO SUPPORT NON-INVASIVE STRUCTURAL DIAGNOSIS AND EMERGENCY ANALYSIS IN THE CONTEXT OF EARTHQUAKE HERITAGE IN ITALY». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLVI-M-1–2021* (agosto): 173–80. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-M-1-2021-173-2021>.

Dlesk, Adam, Karel Vach, e Karel Pavelka. 2022. «Photogrammetric co-processing of thermal infrared images and RGB images». *Sensors* 22 (4): 1655.

Drăguț, Lucian, e Clemens Eisank. 2011. «Object representations at multiple scales from digital elevation models». *Geomorphology* 129 (3–4): 183–89.

El Masri, Yasser, e Tarek Rakha. 2020. «A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections». *Construction and Building Materials* 265 (dicembre): 120542. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120542>.

Eltner, Anette, e Giulia Sofia. 2020. «Chapter 1 - Structure from motion photogrammetric technique». In *Developments in Earth Surface Processes*, a cura di Paolo Tarolli e Simon M. Mudd, 23:1–24. *Remote Sensing of Geomorphology*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>.

Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna. 2007. «Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e

restauro». *OPD restauro* 19: 13–48.

Felici A., Vigna A., 2021.« Le scelte metodologiche e la descrizione dell'intervento di restauro sui supporti dei dipinti murali del lato orenitale», in Paolo Uccello a Santa Maria Novella, *Restauro e studi sulla tecnica in terraverde*, a cura di Cecilia Frosinini.

Fiorini, A. (2012). *Tablet PC, fotogrammetria e PDF 3D: strumenti per documentare l'archeologia*. *Archeologia e calcolatori*, 23, 213-227.

Flemming H.C., (1998), *Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials*. *Polym. Degrad. Stabil.* 59:309–315 ;
Fonstad, Mark A., James T. Dietrich, Brittany C. Courville, Jennifer L. Jensen, e Patrice E. Carbonneau. 2013. «Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement». *Earth Surface Processes and Landforms* 38 (4): 421–30. <https://doi.org/10.1002/esp.3366>.

Frosinini, Cecilia. 2021. *Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde*. Edifir.

Ge, X., e T. Wunderlich. 2015. «Target identification in terrestrial laser scanning». *Survey Review* 47 (341): 129–40. <https://doi.org/10.1179/1752270614Y.0000000097>.

Giorni B. Don (1989), *Monterchi, Sansepolcro*.

Giovanni Secco Suardo (1866), *Manuale ragionato per la parte meccanica dell'arte del restauratore di dipinti*, Pietro Agnelli ed., Milano
Glavaš, Hrvoje, Marijana Hadzima-Nyarko, Ivana Haničar Buljan, e Tomislav Barić. 2019. «Locating hidden elements in walls of cultural heritage buildings by using infrared thermography». *Buildings* 9 (2): 32.

Grechi, Guglielmo, Matteo Fiorucci, Gian Marco Marmoni, e Salvatore Martino. 2021. «3D Thermal Monitoring of Jointed Rock Masses through Infrared Thermography and Photogrammetry». *Remote Sensing* 13 (5): 957. <https://doi.org/10.3390/rs13050957>.

Grelk, B., Goltermann, P., Schouenborg, B., Koch, A., & Alnæs, L. (2004). *The laboratory testing of potential bowing and expansion of marble*. *Dimension stone*, 253-260.

Guglielmi, A., & Prisco, G. (2009). Le operazioni di stacco e la conservazione in situ. Prisco (a cura di), *Filologia dei materiali e trasmissione al futuro. Indagini e schedatura sui dipinti murali del Museo Archeologico Nazionale di Napoli*, Roma, 15-27.

Guilbert, V., Antoine, R., Heinkele, C., Maquaire, O., Costa, S., Gout, C., & Fauchard, C. (2020). Fusion of thermal and visible point clouds: Application to the Vaches Noires landslide, Normandy, France. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 227-232.

Gusella, Vittorio, Federico Cluni, e Riccardo Liberotti. 2020. «Feasibility of a Thermography Nondestructive Technique for Determining the Quality of Historical Frescoed Masonries: Applications on the Templar Church of San Bevignate». *Applied Sciences* 11 (1): 281. <https://doi.org/10.3390/app11010281>.

Ham, Youngjib, e Mani Golparvar-Fard. 2013. «An Automated Vision-Based Method for Rapid 3D Energy Performance Modeling of Existing Buildings Using Thermal and Digital Imagery». *Advanced Engineering Informatics* 27 (3): 395–409. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.03.005>.

Hamid-Lakzaean, Fatemeh. 2020. «Point Cloud Segmentation and Classification of Structural Elements in Multi-Planar Masonry Building Facades». *Automation in Construction* 118 (ottobre): 103232. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103232>.

Hoegner, L., S. Tuttas, Y. Xu, K. Eder, e U. Stilla. 2016. «EVALUATION OF METHODS FOR COREGISTRATION AND FUSION OF RPAS-BASED 3D POINT CLOUDS AND THERMAL INFRARED IMAGES». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B3* (giugno): 241–46. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B3-241-2016>.

Huber, Daniel F., e Martial Hebert. 2003. «Fully automatic registration of multiple 3D data sets». *Image and Vision Computing, Computer Vision beyond the visible spectrum*, 21 (7): 637–50. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(03\)00060-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(03)00060-X).

Iglhaut, Jakob, Carlos Cabo, Stefano Puliti, Livia Piermattei, James O'Connor, e Jacqueline Rosette. 2019. «Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: A Review». *Current*

Forestry Reports 5 (3): 155–68. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>.

Irujo, Gustavo Pereyra. 2022. «IRimage: open source software for processing images from infrared thermal cameras». *PeerJ Computer Science* 8: e977.

ISAC (2007), Istituto per i beni artistici culturali e naturali della Regione Emilia Romagna, *Materiali e Ricerche, Oggetti nel tempo. Principi e tecniche di conservazione preventiva*, © CLUEB Via Marsala, 31 40126 Bologna.

Katlan, A. W. (1994). Early wood-fiber panels: Masonite, hardboard, and lower-density boards. *Journal of the American Institute for conservation*, 33(3), 301-306.

Kelbe, David, Jan van Aardt, Paul Romanczyk, Martin van Leeuwen, e Kerry Cawse-Nicholson. 2016. «Marker-Free Registration of Forest Terrestrial Laser Scanner Data Pairs With Embedded Confidence Metrics». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54 (7): 4314–30. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2539219>.

Korukçu, M. Özgün, e Muhsin Kilic. 2009. «The usage of IR thermography for the temperature measurements inside an automobile cabin». *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (8): 872–77. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.04.010>.

Kovačić, V. (2011). The citadel in Trogir, A Contribution to the Study of the Fortifications of the early 15th Century, *Prilozi povijesti umjetnosti u Dalmaciji*, 42.1: 95-120.

Kylili, Angeliki, Paris A. Fokaidis, Petros Christou, e Soteris A. Kalogirou. 2014. «Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review». *Applied Energy* 134 (dicembre): 531–49. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>.

Lagüela, S., J. Armesto, P. Arias, e J. Herráez. 2012. «Automation of thermographic 3D modelling through image fusion and image matching techniques». *Automation in Construction* 27: 24–31.

Liberti, S. (1951) Sui supporti rigidi per il trasporto degli affreschi. *Bollettino dell'Istituto centrale del restauro*, (5-6), 15-20.

Lin, Dong, Malgorzata Jarzabek-Rychard, Xiaochong Tong, e Hans-Gerd Maas. 2019. «Fusion of Thermal Imagery with Point Clouds for Building Façade Thermal Attribute Mapping». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 151 (maggio): 162–75. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.03.010>.

Lin, Dong, Hans-Gerd Maas, Patrick Westfeld, Helmut Budzier, e Gerald Gerlach. 2018. «An Advanced Radiometric Calibration Approach for Uncooled Thermal Cameras». *The Photogrammetric Record* 33 (161): 30–48. <https://doi.org/10.1111/phor.12216>.

Longhi R. (1957), Per una mostra storica degli “estrattisti” in *Paragone*, VIII, 91, pp. 3-8.

Luschi, C. R., M., Aiello, L., Nucciotti, M., Azzari, M., Vannini, G., & Zamperlin, P. (2019). *Silk Road. Armenia 2014-2015-2016-2017*. In *Dida Research Week. Book 2018* (pp. 556-557). Didapress.

Mariotti P.I.,(1983) Supporti impiegati per il distacco e lo strappo delle pitture murali, in sostituzione dell'originale, dalle origini ad oggi. *Ricerca tecnica sui materiali e sui metodi di impiego. Letture di comportamento, Opificio delle Pietre Dure e Laboratori di Restauro*, Firenze.

Martin, M., Chong, A., Biljecki, F., & Miller, C. (2022). Infrared thermography in the built environment: A multi-scale review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112540.

McAlister, Amber Allison. 2003. *Narrative and allegory in the Genesis fresco cycle in the Chiostro Verde, Santa Maria Novella, Florence*. University of Georgia. <https://search.proquest.com/openview/8ed8141639b0d6a75adb37bdef593978/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>.

Menicali U (1992) I materiali nell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali. *Nuova Italia Scientifica*.

Merchán, Pilar, María José Merchán, Santiago Salamanca, e Antonio Adán. 2018. «Application of Multisensory Technology for Resolution of Problems in the Field of Research and Preservation of Cultural Heritage». In *Advances in Digital Cultural Heritage*, a cura di Marinos Ioannides, João Martins, Roko Žarnić, e Veranika Lim, 10754:32–47. *Lecture Notes in*

Computer Science. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75789-6_3.

Merlo, A. (2020). *Non disegnata ma modellata. Il rilievo della chiesa dell'Autostrada di Giovanni Michelucci*. Firenze: Fupress.

Micelli F., (2016), *Durabilità in ambiente alcalino dei rinforzi fibrosi per il consolidamento strutturale*, Dip. di ingegneria per l'innovazione, Università del Salento.

Mileto, Camilla, Fernando Vegas, e José Luis Lerma. 2015. «Multidisciplinary Studies, Crossreading and Transversal Use of Thermography: The Castle of Monzón (Huesca) as a Case Study». In *MODERN AGE FORTIFICATIONS OF THE MEDITERRANEAN COAST - DEFENSIVE ARCHITECTURE OF THE MEDITERRANEAN (FORTMED2015)*, a cura di Editorial Universitat Politècnica de València. Editorial Universitat Politècnica de València. <https://doi.org/10.4995/FORTMED2015.2015.1786>.

Minardi, Mauro, e Anne Guglielmetti. 2017. *Paolo Uccello. 24 ore cultura*. <https://www.academia.edu/download/56494395/PreviewPU2017breve.pdf>.

Mora P., Mora L., Philippot P., (2001): *La conservazione delle pitture murali*. Editrice Compositori, Bologna.

Morena, S., Bordese, F., Caliano, E., Freda, S., De Feo, E., & Barba, S. (2021). *Architectural Survey Techniques for Degradation Diagnostics. An Application for the Cultural Heritage*. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 449-454.

Navarro, José María Fernández, e E. A. Mari. 1990. «Influencia de la adición de ZrO₂ y TiO₂ sobre el comportamiento químico de vidrios de silicato y borosilicato sodico-cálcico». *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 29 (4): 235–44.

Nishanbaev, Ikrom, Erik Champion, e David A. McMeekin. 2021. «A web GIS-based integration of 3D digital models with linked open data for cultural heritage exploration». *ISPRS International Journal of Geo-Information* 10 (10): 684.

Olmí, R., M. Bini, A. Igesti, S. Priori, C. Riminesi, e A. Felici. 2006. «Diagnostics and Monitoring of Frescoes Using

Evanescence-Field Dielectrometry». *Measurement Science and Technology* 17 (8): 2281. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/8/032>.

Pancani, Giovanni, e Matteo Bigongiari. 2020. «Digital survey for the structural analysis of the Verruca fortress». *Procedia Structural Integrity, Art Collections 2020, Safety Issue (ARCO 2020, SAFETY)*, 29 (gennaio): 149–56. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.151>.

Patrucco, G., F. Giulio Tonolo, G. Sammartano, e A. Spanò. 2022. «SfM-based 3D reconstruction of heritage assets using UAV thermal images». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 43: 399–406.

Patrucco, Giacomo, Antonio Gómez, Ali Adineh, Max Rahrig, e José Luis Lerma. 2022. «3D Data Fusion for Historical Analyses of Heritage Buildings Using Thermal Images: The Palacio de Colomina as a Case Study». *Remote Sensing* 14 (22): 5699. <https://doi.org/10.3390/rs14225699>.

Paulus, Stefan, Henrik Schumann, Heiner Kuhlmann, e Jens Léon. 2014. «High-Precision Laser Scanning System for Capturing 3D Plant Architecture and Analysing Growth of Cereal Plants». *Biosystems Engineering* 121 (maggio): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.010>.

Piras, Ing Marco, e Gandini Gabriele. s.d. «CREAZIONE DI MODELLI “AS BUILT” DI IMPIANTI MEDIANTE STRUMENTI A LUCE STRUTTURATA».

Puliti, Marco, Giovanni Montaggioli, e Alessandro Sabato. 2021. «Automated subsurface defects’ detection using point cloud reconstruction from infrared images». *Automation in Construction* 129: 103829.

Ramos S. J. 2021, Anàlisi sobre l’origen del Castell Monestir Sant Miquel d’Escornalbou, Universitat Oberta de Catalunya (UOC), <http://hdl.handle.net/106>.

Ricciarini M. (2019). Rilievo digitale integrato per la descrizione del complesso fortificato di Trogir. In: Sandro Parrinello - Francesca Picchio. Dalmazia e Montenegro - Le fortificazioni Venete nel Bacino del Mediterraneo Orientale Procedure per la conoscenza e la Documentazione Digitale del Patrimonio Storico Fortificato, Pavia University Press - Edizioni

dell’Università degli Studi di Pavia, ISBN: 9788869521379. pp. 49-56.

Rinaldi, Simona. 1998. I Fiscali, riparatori di dipinti: vicende e concezioni del restauro tra Ottocento e Novecento. Vol. 11. Lithos.

Rodríguez-González, P., A. L. Muñoz-Nieto, S. delPozo, L. J. Sanchez-Aparicio, D. Gonzalez-Aguilera, L. Micoli, S. Gonizzi-Barsanti, et al. 2017. «4D Reconstruction and Visualization of Cultural Heritage: Analyzing Our Legacy through Time». *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-609-2017>.

Rosati S. (1994), Fisica generale, Casa editrice Ambrosiana, Milano,

Rosina, Elisabetta, Marco Scaioni, Andrea L’Erario, e Lucia Diaz-Vilarino. 2017. «Integration of infrared thermography and photogrammetric surveying of built landscape». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42: 153–60.

Ryniewicz, Anna M., Andrzej Ryniewicz, Łukasz Bojko, Wiktoria Gołębiowska, Maciej Cichoński, e Tomasz Madej. 2017. «The Use of Laser Scanning in the Procedures Replacing Lower Limbs with Prosthesis». *Measurement* 112 (dicembre): 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.041>.

Rueden, Curtis T., Johannes Schindelin, Mark C. Hiner, Barry E. DeZonia, Alison E. Walter, Ellen T. Arena, e Kevin W. Eliceiri. 2017. «ImageJ2: ImageJ for the next Generation of Scientific Image Data». *BMC Bioinformatics* 18 (1): 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>.

Russo, J., Luppichini, S., Stefani, C., & Piqué, F. 2020, November. The study of Severini’s wall paintings in Switzerland: how to manage heterogeneity of data and team members?. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 949, No. 1, p. 012025). IOP Publishing.

Sanabra Ramos, J. (2021). Anàlisi sobre l’origen del Castell Monestir Sant Miquel d’Escornalbou, Universitat Oberta de Catalunya (UOC), <http://hdl.handle.net/10609/131826>.

Sala, María Soler. 2017. «Mapeando la Edad Media. El uso de

los GIS en el estudio de la sociedad, la economía, el territorio, la actividad notarial y el paisaje monástico medieval». In *III Congreso de la Sociedad Internacional Humanidades Digitales Hispánicas Sociedades, políticas, saberes* (Libro de resúmenes).

Salvadori B., Manganelli Del Fà R., Riminesi C., Proposta per un approccio interdisciplinare di monitoraggio dei dipinti murali strappati, *Kermes: la rivista del restauro*, Ed. Nardini Edito-re, 116, pp. 75-82, (2019).

Sdegno, A., Cochelli, P., & Riavis, V. (2018). Ricerche su architetture croate: indagine, analisi geometrica e ricostruzione digitale/Researches on Croatian Buildings: Survey, Geometrical Analysis and Digital Reconstruction. In *Programmi multidisciplinari per l'internazionalizzazione della ricerca. Patrimonio culturale, Architettura e Paesaggio* (pp. 236-241). *Didapress Dipartimento di Architettura Università degli Studi di Firenze*.

Soler Sala M., Ferretti R., Cioli F. 2023, The Monastic of Sant Miquel d’Escornalbou: multidisciplinary research for the understanding of the relation between the religious complex, the territory and the European Franciscan network, *VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability*, 8(special issue), pp. 94-109. <https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.18846>.

Santulli C. (2017), Degradazione della vetroresina per effetto di presenza di acqua od irradiazione ultravioletta, Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e Ambiente Sapienza-Università di Roma, Via Eudossiana Roma, Schindelin, Johannes, Ignacio Arganda-Carreras, Erwin Frise, Verena Kaynig, Mark Longair, Tobias Pietzsch, Stephan Preibisch, Curtis Rueden, Stephan Saalfeld, e Benjamin Schmid. 2012. «Fiji: an open-source platform for biological-image analysis». *Nature methods* 9 (7): 676–82.

Schindelin, Johannes, Ignacio Arganda-Carreras, Erwin Frise, Verena Kaynig, Mark Longair, Tobias Pietzsch, Stephan Preibisch, Curtis Rueden, Stephan Saalfeld, e Benjamin Schmid. 2012. «Fiji: an open-source platform for biological-image analysis». *Nature methods* 9 (7): 676–82.

Simon Chane, Camille, Alamin Mansouri, Franck S. Marzani, e Frank Boochs. 2013. «Integration of 3D and Multispectral Data for Cultural Heritage Applications: Survey and Perspectives». *Image and Vision Computing* 31 (1): 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2012.10.006>.

[org/10.1016/j.imavis.2012.10.006](https://doi.org/10.1016/j.imavis.2012.10.006).

Solla, Mercedes, Luisa MS Gonçalves, Gil Gonçalves, Carina Francisco, Iván Puente, Paulo Providência, Florindo Gaspar, e Hugo Rodrigues. 2020. «A building information modeling approach to integrate geomatic data for the documentation and preservation of cultural heritage». *Remote Sensing* 12 (24): 4028.

Stahlbuhk, K. (2019). La Genesi del Chiostro Verde tra stacchi, strappi e vicende conservative. *Kermes: la rivista del restauro*, (116), 25-32.

Sutherland, Neil, Stuart Marsh, Gary Priestnall, Paul Bryan, e Jon Mills. 2023. «InfraRed Thermography and 3D-Data Fusion for Architectural Heritage: A Scoping Review». *Remote Sensing* 15 (9): 2422.

Tejedor, Blanca, Elena Lucchi, David Bienvenido-Huertas, e Iole Nardi. 2022. «Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and futures perspectives». *Energy and Buildings* 263: 112029.

Theiler, Pascal Willy, Jan Dirk Wegner, e Konrad Schindler. 2015. «Globally consistent registration of terrestrial laser scans via graph optimization». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 109 (novembre): 126–38. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.08.007>.

Tintori L., A. Del Serra, (1981), Nuove metodologie nel distacco degli affreschi, *Atti del Convegno sul restauro delle opere d'arte*, Firenze, 2-7 novembre 1976, Edizioni Polistampa, Firenze, pp. 157-159 441- 443.

Tucci G, Visintini D, Bonora V, Parisi, 2018, EI. Examination of Indoor Mobile Mapping Systems in a Diversified Internal/ External Test Field. *Applied Sciences.*; 8(3):401. <https://doi.org/10.3390/app8030401>.

Ulisse Forni, (1866), Manuale del pittore restauratore, Le Monnier ed., Firenze.

Usamentiaga, R., D. F. Garcia, C. Ibarra-Castanedo, e X. Maldague. 2017. «Highly accurate geometric calibration for infrared cameras using inexpensive calibration targets». *Measurement* 112: 105–16.

Usamentiaga, R., D. F. Garcia, C. Ibarra-Castanedo, e X.

Maldague. 2017. «Highly accurate geometric calibration for infrared cameras using inexpensive calibration targets». *Measurement* 112: 105–16.

Wang, Shuyue, Yanbo Yang, Zhunga Liu, e Quan Pan. 2023. «Target Recognition with Fusion of Visible and Infrared Images Based on Mutual Learning». *Soft Computing* 27 (12): 7879–94. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08010-5>.

Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey, e J. M. Reynolds. 2012. «‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications». *Geomorphology* 179 (dicembre): 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

Wilson, L., A. Rawlinson, D. S. Mitchell, D. K. Pritchard, e H. C. McGregor. 2012. «3D documentation of global historic sites: The ‘Scottish Ten’ project and its applications for cultural heritage». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38: 39–44.

Wong, L., Rose, W., Dhanda, A., Flavin, A., Barazzetti, L., Ouimet, C., & Santana Quintero, M. (2021). Maximizing the Value of Photogrammetric Surveys in the Conservation of Wall Paintings. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 46, 851-857.

RIFERIMENTI ARCHIVISTICI

SBAA_FI: SOPRINTENDENZA PER I BENI AMBIENTALI ED ARCHITETTONICI PER LE PROVINCE DI FIRENZE E PISTOIA (SBAA_FI)“FRENCH MINISTRY OF FOREIGN RELATIONS, RESTORATION WORK ON THE FACADES OF PALAZZO LENZI, SEAT OF THE GENERAL CONSULATE OF FRANCE IN FLORENCE AND THE FRENCH INSTITUTE” NO. 165/1°/1984, (1984).

ASCF: ARCHIVIO COMUNALE STORICO DI FIRENZE.

SITOGRAFIA E RISORSE ONLINE

«3dmetrica - Topografia - Fotogrammetria - Laser scanning - Rilievi 3D». s.d. Consultato 17 Novembre 2023. <https://3dmetrica.it/>.

«icom_cc_resolution_on_terminology_english.pdf». s.d. Consultato 17 ottobre 2023.

https://www.iccrom.org/sites/default/files/2022,02/icom_cc_resolution_on_terminology_english.pdf.

«Caratteristiche degli strumenti di misura.pdf». s.d. Consultato 19 ottobre 2023. https://fisicaechimica.unipa.it/agliolo/TFA/lezioni/didattica_laboratoriale_della_fisica/Caratteristiche_degli_strumenti_di_misura.pdf.

«Catalogo Generale Dei Beni Culturali». s.d. Consultato 28 novembre 2023. <http://www.catalogo.beniculturali.it>.

<http://www.tuttolegno.eu/glossario-vocabolario-del-legno.html>.

<https://imagej.net/downloads>.

<https://github.com/gpereyrairujo/IRimage>.

<https://support.flir.com/resources/>.

https://flir.custhelp.com/app/utils/fl_fovCalc/pn/793060201/ret_url/%252Fapp%252Ffl_download_datasheets%252Fid%252F1052.

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf.

<https://patrimonio.archivioluce.com/luce-web>.

Object, object. s.d. «Potenzialità e prospettive delle tecnologie avanzate di rilevamento per la conservazione dell’architettura storica.» Consultato 19 ottobre 2023. <https://core.ac.uk/reader/11919030>.

«risk_management_guide_english_web.pdf». s.d. Consultato 17 ottobre 2023. https://www.iccrom.org/sites/default/files/2017-12/risk_management_guide_english_web.pdf.

«risk_manual_2016-eng.pdf». s.d. Consultato 17 ottobre 2023. https://www.iccrom.org/sites/default/files/2017-12/risk_manual_2016-eng.pdf.

UNI ISO 31000:2018 Gestione del rischio - Linee guida.

CREDITI

PROGETTI DI RICERCA

Vengono di seguito riportati i crediti relativi ai progetti di ricerca i cui casi studio sono stati presi in considerazione per le analisi e le sperimentazioni portate avanti all'interno della presente tesi di dottorato.

MUSE: INTEGRAZIONE DI SISTEMI ICT PER IL MONITORAGGIO DEL CONTENUTO DI UMIDITÀ IN STRUTTURE LIGNEE

Durata:	2020-2021
Responsabile Scientifico:	1° ricercatore Roberto Olmi <i>CNR-IFAC</i>
Area Tematica	Engineering, ICT and technologies for energy and transportation
Area Progettuale	Tecnologie per la Fruizione e Salvaguardia dei Beni Culturali
Coordinatori Scientifici:	1° ricercatore Cristiano Riminesi <i>CNR-ISPC</i>
Coordinatori Tecnici:	Simone Campinoti, presidente CEAM Equipment Srl
Collaboratori CNR-ISPC:	Cristiano Riminesi Luciano Scaletti Sofia Brizzi
Partnership:	CEAM Equipment Srl Campigli Legnami Srl LegnoPiù Srl Rangoni Basilio Srl Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR- IBE, CNR-IFAC, CNR-ISPC)

INTERARCH INTEGRAZIONI DI TECNOLOGIE ABILITANTI PER LA CONSERVAZIONE DEI MATERIALI DELL'ARCHITETTURA DEI BENI CULTURALI

Durata:	feb. 2021- ago. 2022
Area Tematica	Scienze umane e sociali, patrimonio culturale
Area Progettuale	Diagnosi, intervento e conservazione del patrimonio culturale
Responsabile scientifico	1° ricercatore Cristiano Riminesi CNR-ISPC
Coordinatori Scientifici:	Silvia Starinieri

	Piacenti SpA
Coordinatori Tecnici:	Matteo Piacenti Piacenti S.P.A.
Collaboratori CNR-ISPC:	Cristiano Riminesi Luciano Scaletti Sofia Brizzi
Partnership:	Piacenti S.P.A. Next Technology Tecnotessile Consiglio Nazionale Delle Ricerche, Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (CNR-ISPC sede di Firenze)

IPERION HS “INTEGRATING PLATFORMS FOR THE EUROPEAN RESEARCH INFRASTRUCTURE ON HERITAGE SCIENCE”

Durata:	2022-2023
Area Tematica	Scienze fisiche e tecnologie della materia
Area Progettuale	Infrastrutture di ricerca, strumentazione avanzata e nuove metodologie sperimentali e di calcolo
Responsabile Scientifico:	Ricercatore Barbara Salvadori <i>CNR-ISPC</i>
Coordinatori Scientifici:	Luca Pezzati Consiglio Nazionale delle Ricerche, INO Italia
Collaboratori CNR-ISPC:	Costanza Miliani David Buti Barbara Salvadori Donata Magrini Sofia Pescarin Sofia Brizzi Cristiano Riminesi
Partnership:	Università Nazionale Autonoma del Messico, Messico Istituto reale per i beni culturali, Belgio Istituto di Cipro, Cipro Centro nazionale francese per la ricerca scientifica, Francia Università Nicolaus Copernicus, Polonia University College di Londra, Regno Unito Smithsonian Institution, Stati Uniti

Fondazione prussiana per il patrimonio culturale, Germania
Università di Malta, Malta
Università di Oslo, Norvegia
Istituto di Meccanica Teorica e Applicata, Repubblica Ceca
Istituto per la protezione del patrimonio culturale della Slovenia, Slovenia
Istituto MTA per la ricerca nucleare, Ungheria
Autorità israeliana per le antichità, Israele
Consiglio Nazionale delle Ricerche spagnolo, Spagna
Il J. Paul Getty Trust, Stati Uniti
Università di Copenaghen, Danimarca
IDRYMA TECHNOLOGIAS KAI EREVNAS, EL
Ente svedese per il patrimonio nazionale, Svezia
Ministero dell'Istruzione, della Cultura e della Scienza, Paesi Bassi
Università di Évora, Portogallo
Università Federale di Minas Gerais, Brasile

Website: <https://www.iperionhs.eu>

INDICE DELLE FIGURE

Vengono di seguito riportati i crediti relativi alle immagini dei vari capitoli della presente tesi di dottorato. Tutte le immagini o foto non espressamente riportate all'interno del seguente elenco sono da intendersi interamente a cura dell'autore.

CAPITOLO 1

Fig. 1.2 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da: <https://www.google.it/search?q=chiostri+di+firenze+con+affreschi&tbm>

Fig. 1.3, 1.4 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da: tesi di laurea di Dutto Alessia, Dipartimento di Arti Applicate, Accademia Belli Arti di Bologna "LO STUDIO

DEL SISTEMA DI ADESIONE DEL DIPINTO AD UN SUPPORTO MOBILE: SPERIMENTAZIONE E ANALISI DEL METODO DI IMPIEGO DI RESINE TERMO-REVERSIBILI". Relatore: Prof. Andrea Vigna, correlatore: Prof. Michele Di Foggia. AA: 2019-2020.

Fig. 1.5 Frosinini, Cecilia. 2021. Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverd, Edifir.

Fig. 1.6 Botticelli G. (2010), Metodologia di restauro delle pitture murali, Centro Di Edizioni, Firenze.

Fig. 1.7, 1.9, 1.10 Tesi di laurea magistrale di Martina Calmanti, Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo Opificio delle Pietre Dure- Firenze Scuola di Alta Formazione e di Studio, Corso di Diploma di durata quinquennale, equiparato alla Laurea a ciclo unico LMR/02 in Conservazione e Restauro dei Beni Culturali, Percorso Formativo e Professionalizzante I.materiali Lapidici e Derivati. Superfici decorate dell'architettura. " Proposte innovative per la conservazione di un dipinto murale strappato applicato su supporto in Masonite. Un caso applicativo: La Crocifissione e i Santi Domenico e Tommaso d'Aquino in umiltà, nel Chiostro Verde di Santa Maria Novella. Relatore: Alberto Felici; Correlatori; Paola Ilaria Mriotti, Giancarlo Lanterna, Benedetto Pizzo, Cecelia Frosinini.

Fig. 1.14, 1.15 Botticelli G. (2010), Metodologia di restauro delle pitture murali, Centro Di Edizioni, Firenze.

Fig. 1.16 Di Vilio, C., & Grassia, 2019, L. Valutazione della vita a fatica e della resistenza residua di materiali compositi sottoposti a carichi di ampiezza variabile.

CAPITOLO 2

Fig. 2.2 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da: https://www.google.it/search?q=santa+maria+novella&ca_esv

Fig. 2.5 ASCF: ARCHIVIO COMUNALE STORICO DI FIRENZE, il chiostro verde di santa maria novella.

Fig. 2.8, 2.10, 2.11, 2.1, 2.13 Frosinini, Cecilia. 2021. Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverd, Edifir.

FIG. 2.9 Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna. 2007. «Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro». OPD restauro 19: 13–48.

FIGG. 2.16, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 Felici A., Vigna A., 2021. «Le scelte metodologiche e la descrizione dell'intervento di restauro sui supporti dei dipinti murali del lato orenitale», in *Paolo Uccello a Santa Maria Novella, Restauro e studi sulla tecnica in terraverde*, a cura di Cecilia Frosinini.

FIGG. 2.24, 2.25, 2.26 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

- Ciccone B., Boddi R., Felici A., Olmi R., Priori S., Riminesi C., Vigna A. «RILEVAMENTI TERMO IGROMETRICI IN SITU MEDIANTE SPETTROSCOPIA DIELETTICA A MICROONDE SUI DIPINTI MURALI DI DUE CHIOSTRI FIORENTINI: IL CHIOSTRO DI SANT'ANTONINO DI SAN MARCO E IL CHIOSTRO VERDE DI SANTA MARIA NOVELLA». Monitoraggio del patrimonio monumentale e conservazione programmata, a cura di Poaola Croveri e Oscar Chiantore. Torino, 25 Novembre 2005

- Felici, Alberto, Serena Pini, e Andrea Vigna. 2007. «Il Chiostro Verde nel complesso di Santa Maria Novella a Firenze: storia e restauro». OPD restauro 19: 13–48.

- Bandini, F., Felici, A., Frosinini, C., & Vigna, A. (2012). Lo stato di avanzamento dei lavori nel restauro dei dipinti murali del lato orientale del Chiostro Verde di Santa Maria Novella a Firenze. OPD Restauro, (24), 299-300.

FIG. 2.27 Salvadori B., Manganelli Del Fà R., Riminesi C., Proposta per un approccio interdisciplinare di monitoraggio dei dipinti murali strappati, *Kermes: la rivista del restauro*, Ed. Nardini Edi-tore, 116, pp. 75-82, (2019).

FIG. 2.29 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

- <https://www.catalogo.beniculturali.it/>

- Vigna A., 2021. I restauri dell'Opificio delle Pietre Dure al Chiostro Verde (2005-2019), in *Paolo Uccello a Santa Maria Novella, Restauro e studi sulla tecnica in terraverde*, a cura di Cecilia Frosinini.

FIGG. 2.31, 2.32, 2.33, 2.34

https://www.iccrom.org/sites/default/files/2017-12/risk_manual_2016-eng.pdf.

CAPITOLO 3

TAB. 3.1 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

https://www.laserscanning-europe.com/sites/default/files/redakteur_images/faro-focus-m-70-tech-sheet_0.pdf

TAB. 3.2 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

https://zf-usa.com/wp-content/uploads/2021/06/ZF-IMAGER-5016_Datasheet-E_compr.pdf.

TAB. 3.3 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

<https://www.atecorp.com/atecorp/media/pdfs/datasheets/hexagon-romer-absolute-arm-datasheet-1.pdf?ext=.pdf>.

FIG. 3.8 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Russo, Michele, Fabio Remondino, and Gabriele Guidi. "Principali tecniche e strumenti per il rilievo tridimensionale in ambito archeologico." *Archeologia e calcolatori* 22 (2011): 169-198.

TAB. 3.4 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

<https://www.flir.it/support/products/t540/?vertical=condition+monitoring&segment=solutions#Overview>

CAPITOLO 4

FIGG. 4.1, 4.2 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Sutherland, Neil, Stuart Marsh, Gary Priestnall, Paul Bryan, e Jon Mills. 2023. «InfraRed Thermography and 3D-Data Fusion for Architectural Heritage: A Scoping Review». *Remote Sensing* 15 (9): 2422.

FIG. 4.3 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Adamopoulos, Efstathios, Monica Volinia, Mario Giroto, e Fulvio Rinaudo, 2020. «Three-Dimensional Thermal Mapping from IRT Images for Rapid Architectural Heritage NDT». *Buildings* 10 (ottobre): 187. <https://doi.org/10.3390/buildings10100187>.

FIG. 4.4 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Patrucco, G., F. Giulio Tonolo, G. Sammartano, e A. Spanò. 2022. «SfM-based 3D reconstruction of heritage assets using UAV thermal images». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 43: 399–406.

FIG. 4.5 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Costanzo, A., Minasi M., Casula G., Musacchio M., e Buongiorno M.F., 2014. «Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building». *Sensors* 15 (1): 194–213.

FIG. 4.8 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

- Rueden, Curtis T., Johannes Schindelin, Mark C. Hiner, Barry E. DeZonia, Alison E. Walter, Ellen T. Arena, e Kevin W. Eliceiri. 2017. «ImageJ2: ImageJ for the next Generation of Scientific Image Data». *BMC Bioinformatics* 18 (1): 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>.
- <https://imagej.net>.

FIG. 4.9

https://flir.custhelp.com/app/utils/fl_fovCalc/pn/79306-0201/ret_url/%252Fapp%252Ffl_download_datasheets%252Fid%252F1052

CAPITOLO 5

FIGG. 5.21, 5.23 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da: Frosinini, Cecilia. 2021. *Paolo Uccello a Santa Maria Novella: restauro e studi sulla tecnica in terraverde*, Edifir.

CAPITOLO 6

FIG. 6.1 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

- <https://www.google.com/maps>

FIG. 6.8 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Soler Sala M., Ferretti R., Cioli F. 2023, *The Monastic of Sant Miquel d'Escornalbou: multidisciplinary research for the understanding of the relation between the religious complex, the territory and the European Franciscan network*, VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability, 8(special issue), pp. 94-109. <https://doi.org/10.4995/vitrivio-ijats.2023.18846>.

FIG. 6.10 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

- Sanabra Ramos, J. (2021). Anàlisi sobre l'origen del Castell Monestir Sant Miquel d'Escornalbou, Universitat Oberta de Catalunya (UOC), <http://hdl.handle.net/10609/131826>.
- <https://www.google.it/search?q=sant+miquel+d%27escornalbou+foto+storiche&tbm=isch&chips=q:sant+miquel+d+escor>

[nalbou+foto+storiche,online](#).

FIGG 6.14, 6.15, 6.16 Foto storiche tratte da:

Sanabra Ramos, J. (2021). Anàlisi sobre l'origen del Castell Monestir Sant Miquel d'Escornalbou, Universitat Oberta de Catalunya (UOC), <http://hdl.handle.net/10609/131826>.

FIG. 6.18 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Alinari S., laurea triennale in Scienze dell'architettura (L-17) con tesi dal titolo: "Indagini conoscitive funzionali alla conservazione del Castell Monestir de Sant miquel de Escornalbou in Tarragona, Spagna". Relatore: S. Bertocci, Correlatori: F. Cioli, S.Brizzi.

FIG. 6.20 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

- Trogir, memoria ed innovazione. Rilievo, conservazione e valorizzazione attraverso l'indagine scientifica | Trogir, memory and innovation. Survey, conservation and valorization through scientific analyses Neno Toric, Nikša Jajac, Katja Marasovic, Stefano Bertocci, Michelangelo Pivetta, Marco Ricciarini, Eugenia Bordini, Federico Cioli, Anastasia Cottini, Andrea Lumini, Cristiano Riminesi, Angela Calia, Marta Rapallini, Maria Elena Fedi, Emanuela Sibilica.

- Bertocci, S. (2019), *La documentazione del centro storico di Trogir. Un processo di analisi per la conoscenza di siti UNESCO*, in Parrinello, S., Picchio, F. (a cura di), *Dalmazia e Montenegro. Le fortificazioni Venete nel Bacino del Mediterraneo Orientale. Procedure per la conoscenza e la Documentazione Digitale del Patrimonio Storico Fortificato*, Pavia University Press, Pavia, IT, pp. 39-48

FIG. 6.27 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Archivio storico Istituto Luce, il castello del Camerlengo.

FIG. 6.28 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

Kovačić, V. (2011). *The citadel in Trogir, A Contribution to the Study of the Fortifications of the early 15th Century*, *Prilozi povijesti umjetnosti u Dalmaciji*, 42.1: 95-120.

FIG. 6.29 Rielaborazione grafica dell'autore tratta da:

<https://www.google.it/search?q=il+castello+del+camerlengo+a+trogir>

ABSTRACT

La conservazione del Patrimonio Culturale e la sua appropriata valorizzazione necessitano di un'approfondita documentazione sia in termini storico-artistici che per quanto concerne le caratteristiche fisiche di posizione, forma, colore e geometria. Le discipline del rilievo hanno affinato le tecniche di acquisizione digitale dei dati permettendo di rilevare e rappresentare con notevole accuratezza oggetti tridimensionali come sculture e reperti archeologici, nonché elementi di grandi dimensioni quali strutture architettoniche fino ad elementi in scala sub-millimetrica. È a partire da questi presupposti che le tecnologie di rilievo digitale e tutte le molteplici potenzialità che esse offrono costituiscono metodologie oggi imprescindibili ai fini della conservazione preventiva dei beni culturali.

Da questi presupposti lo studio si è mosso verso la ricerca e la sperimentazione di metodi in grado di soddisfare i criteri della conservazione programmata dei dipinti murali staccati e applicati su varie tipologie di supporti mobili. La tecnica dello strappo e dello stacco dei dipinti murali dal loro supporto originale, oggi usato soltanto in casi di estremo degrado delle strutture, ha rappresentato, fin dall'antichità, una delle principali metodologie per evitare la perdita del dipinto soggetto a processi di degrado di varia natura e per scoprire la sinopia realizzata sull'arriccio. In tale contesto si inserisce lo studio del ciclo di affreschi del chiostro Verde, nella basilica di Santa Maria Novella (Firenze) che conserva un notevole numero di affreschi staccati e strappati, tra cui opere di Paolo Uccello, Dello Delli e altri pittori minori. Il distacco dalle murature del chiostro iniziò grazie a Domenico Fiscali, e continuò nel 1952 con l'Istituto Centrale del Restauro. Il lavoro si concluse con il trasporto dei dipinti su varie tipologie di supporti, eseguito nel 1954 da Leonetto Tintori. Questi dipinti murali presentano, ad oggi, diverse tipologie di degrado, tra cui deformazioni localizzate, perdita di funzionalità del sistema di ancoraggio alla muratura, sollevamento e perdita di colore.

Alla luce di tali problematiche è stato avviato uno studio interdisciplinare sugli affreschi e sul complesso architettonico nel quale essi sono inseriti, effettuato mediante metodi non invasivi e non distruttivi, tra cui la termografia infrarossa, rilievo laser scanner 3D,

ITA

fotogrammetria *Structure from Motion*, rilievo topografico e di dettaglio con laser *close-range*. Tali metodologie di rilievo multi-scala e multi-sensore risultano infatti come metodi indispensabili per la costruzione dell'apparato critico dello stato di conservazione degli affreschi e per la ricerca di un adeguato protocollo conservativo. Mediante tali indagini è stato possibile quantificare le deformazioni subite dai supporti, acquisire le linee di controllo geometrico per il monitoraggio dei movimenti e delle deformazioni subite stagionalmente dai pannelli e verificare se tali movimenti hanno provocato la formazione di *craquelures*, cretti o sollevamenti sulla pellicola pittorica.

L'interoperabilità dell'approccio multi-analitico proposto in questa tesi di dottorato permetterà di effettuare un controllo periodico della planarità dei supporti in modo da valutarne i rischi, monitorarli e analizzare le cause e gli effetti che hanno prodotto sugli affreschi, con l'obiettivo finale di definire un adeguato protocollo conservativo adatto a questa tipologia di bene culturale, ma applicabile anche ad altri casi di studio che presentano problematiche simili. È stato infatti osservato come le criticità di conservazione riscontrate presso il chiostro Verde siano analoghe ad altri contesti (nel solo centro storico di Firenze vi è un'ampia casistica di chiostri con affreschi staccati riportati su Masonite, vetroresina e supporti compositi che presentano gravi problemi di degrado derivanti dai supporti).

ABSTRACT

The conservation of Cultural Heritage and its appropriate valorization require in-depth documentation in terms of both art history and the physical characteristics of position, shape, color, and geometry. The disciplines of surveying have refined digital data acquisition techniques, enabling the detection and representation of three-dimensional objects such as sculptures and archaeological finds, as well as large-scale elements like architectural structures, down to sub-millimeter scale elements with remarkable accuracy. From these backgrounds, digital survey technologies and their many potentials constitute indispensable methodologies for the preventive conservation of Cultural Heritage.

Based on these requirements, the study moved towards researching and experimenting with methods able to meet the criteria for the planned conservation of detached wall paintings applied to various types of movable supports. The technique of detaching wall paintings ("strappo" and "stacco" techniques) from their natural support, used nowadays only in cases of extreme structural deterioration, has historically been one of the primary methods to prevent the loss of paintings subjected to various deterioration processes and to uncover the preparatory drawing of the fresco (sinopia).

This is the context for the study of the fresco cycle in the Verde cloister in the basilica of Santa Maria Novella (Florence), which contains a large number of detached wall paintings, including works by Paolo Uccello, Dello Delli, and other minor painters. The detachment of the wall paintings from the cloister walls began with Domenico Fieschi and continued in 1952 with the Central Institute for Restoration in Rome. The work concluded with the transport, carried out in 1954 by Leonetto Tintori, onto various types of supports. Today, these frescoes show various types of degradation, including localized deformations, loss of functionality of the anchoring system to the masonry, rising dampness phenomena, and loss of original color. Starting from these problems, an interdisciplinary study was carried out on the frescoes and the architectural complex in which they are located, using Non-Invasive and Non-Destructive Techniques (NDTs), including

infrared thermography (IRT), 3D laser scanning survey, Structure from Motion photogrammetry, topographic survey, and close-range laser scanning. These multi-scale and multi-sensor digital methodologies are essential to build a critical apparatus of the state of conservation of the frescoes and to develop an appropriate conservation protocol. Through these surveys, it was possible to quantify the deformations suffered by the supports, acquire geometric control lines for monitoring the seasonal movements and deformations of the panels, and verify whether these movements have caused or will cause the formation of craquelures, cracks, or raising on the painted film.

The interoperability of the multi-analytical approach proposed in this doctoral thesis will enable periodic control of the flatness of the supports to assess the risks, monitor them, and analyze the causes and effects they have produced on the wall paintings. The final objective is to define an adequate conservation protocol suitable for this type of cultural object, but also potentially applicable to other case studies with similar problems. Indeed, it was observed that the conservation problems encountered at the Verde cloister are similar to those in other contexts (in the historical center of Florence there are many cloisters with detached wall paintings on Masonite, fiberglass, and composite supports that present serious degradation issues deriving from the supports).

ENG