

**M. FRANCUCCI, M. CIAFFI,
M. FERRI DE COLLIBUS, M. PISTILLI**

Dipartimento Nucleare
Divisione Tecnologie Fisiche e Sicurezza
Laboratorio Diagnostiche e Metrologia
Centro Ricerche Frascati

C. CIANFRIGLIA

ENEA guest
Università degli Studi di Roma Tor Vergata
Facoltà di Lettere e Filosofia
Dipartimento di Storia dell'Arte
Via Columbia 1, 00133 Roma

G. FORNETTI

ENEA guest

**DIGITALIZZAZIONE NELL'INFRAROSSO AD ALTA
RISOLUZIONE CON SISTEMA LASER SCANNER
PROTOTIPALE IR-ITR DEGLI AFFRESCHI
ALTOMEDIEVALI CONSERVATI NELLA BASILICA
PALEOCRISTIANA DI SAN CLEMENTE, ROMA**

RT/2024/15/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

M. FRANCUCCI, M. CIAFFI,
M. FERRI DE COLLIBUS, M. PISTILLI

Dipartimento Nucleare
Divisione Tecnologie Fisiche e Sicurezza
Laboratorio Diagnostiche e Metrologia
Centro Ricerche Frascati

G. FORNETTI

ENEA guest

C. CIANFRIGLIA

ENEA guest
Università degli Studi di Roma Tor Vergata
Facoltà di Lettere e Filosofia
Dipartimento di Storia dell'Arte
Via Columbia 1, 00133 Roma

DIGITALIZZAZIONE NELL'INFRAROSSO AD ALTA
RISOLUZIONE CON SISTEMA LASER SCANNER
PROTOTIPALE IR-ITR DEGLI AFFRESCHI
ALTOMEDIEVALI CONSERVATI NELLA BASILICA
PALEOCRISTIANA DI SAN CLEMENTE, ROMA

RT/2024/15/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

DIGITALIZZAZIONE NELL'INFRAROSSO AD ALTA RISOLUZIONE CON SISTEMA LASER SCANNER PROTOTIPALE IR-ITR DEGLI AFFRESCHI ALTOMEDIEVALI CONSERVATI NELLA BASILICA PALEOCRISTIANA DI SAN CLEMENTE, ROMA

M. Francucci, C. Cianfriglia, G. Fornetti, M. Ciaffi, M. Ferri De Collibus, M. Pistilli

Riassunto

Un esempio di applicazione delle nuove tecnologie, ed in particolare di quella laser scanner, nel campo dei beni culturali per la loro tutela, conservazione e fruizione viene descritto considerando il caso di studio delle pitture murali altomedievali di particolare interesse storico-artistico conservate nella basilica paleocristiana di San Clemente (Roma). In particolare la digitalizzazione ad alta risoluzione nell'infrarosso di tali pitture effettuata con il sistema prototipale ENEA di laser scanner IR-ITR (Infrared Imaging Topological Radar) ed i risultati ottenuti vengono presentati e discussi come metodo innovativo e oggettivo d'indagine che può essere affiancato alle tecniche tradizionali per lo sviluppo di sistemi di analisi e di studio multidisciplinari. Questi ultimi consentono di rafforzare il sodalizio tra arte e tecnologia e di raggiungere un più alto livello di conoscenza, tutela, accessibilità e divulgazione delle opere d'arte di interesse. In tale contesto verrà descritta la campagna di misure svolta nell'ottobre 2023 con IR-ITR nella basilica paleocristiana di San Clemente con i relativi risultati ottenuti. Lo scopo di tali misure è stato quello di rilevare eventuali dettagli nascosti presenti nelle pitture murali altomedievali non visibili ad occhio nudo o con tecniche operanti nel visibile, oltre che migliorare la leggibilità delle opere d'arte di interesse che presentano un cattivo stato di conservazione per favorirne il loro recupero parziale, almeno dal punto di vista digitale, e per consentire una loro corretta interpretazione storico-artistica laddove questa sia incerta.

Abstract

An example of application of new technologies, especially of the laser scanner one, in the field of cultural heritage for their safeguard, conservation and fruition is described considering the case study of early medieval wall paintings of special historical-artistic interest preserved in the early Christian basilica of San Clemente (Rome). Particularly, the high-resolution infrared digitalization of these paintings carried out by the ENEA prototype system of laser scanner named IR-ITR (Infrared Imaging Topological Radar) and the results obtained are presented and discussed as an innovative objective method of investigation that can be used along with traditional techniques for the development of multidisciplinary systems of analysis and study. These ones allow to strengthen the union between art and technology and to achieve a higher level of knowledge, safeguard, accessibility and dissemination of artworks under investigation. Within this framework, the field campaign carried out in October 2023 by means of the IR-ITR in the early Christian basilica of San Clemente will be described with the relative obtained results. The purpose of these measures was to detect hidden details eventually present in the early medieval wall paintings that are not visible to the naked eye or with techniques operating in the visible as well as to improve the legibility of the artworks of interest that are in a poor state of preservation in order to facilitate their partial recovery, at least from the digital point of view, and to allow their correct historical interpretation where this is uncertain.

Keywords: Laser scanner, basilica paleocristiana di San Clemente, pitture murali, digitalizzazione IR, dettagli nascosti, digital recovery.

INDICE

1.	INTRODUZIONE	5
2.	OGGETTO DELLA RICERCA: LE PITTURE ALTOMEDIEVALI NELLA BASILICA PALEOCRISTIANA DI SAN CLEMENTE A ROMA	7
3.	<i>STATUS QUESTIONIS</i> E OBIETTIVI DELLE NUOVE INDAGINI	7
4.	SISTEMA LASER SCANNER IR-ITR OPERANTE NELL'INFRAROSSO	12
5.	RISULTATI DELLE MISURE CON SISTEMA LASER SCANNER IR-ITR A SAN CLEMENTE	15
6.	CONCLUSIONI	20
7.	BIBLIOGRAFIA	21
8.	RINGRAZIAMENTI	23

1. INTRODUZIONE

L'arte e la tecnologia, storicamente considerate da sempre come due discipline lontane e distinte, recentemente hanno cominciato a dialogare tra loro e a trovare punti d'incontro con un proficuo scambio di informazioni utile ad arricchire il know-how di entrambe. La collaborazione e il sodalizio tra di esse possono diventare, quindi, una realtà concreta e non più solo auspicabile per consentire di raggiungere una maggiore accessibilità, divulgazione, conoscenza e tutela delle opere d'arte in tutti i loro aspetti che comprendano il campo della fruizione, conservazione e valorizzazione dei beni artistici e culturali [1]. La compenetrazione tra studi storico-artistici e scientifici ha subito, infatti, negli ultimi anni una forte accelerazione, che ha permesso di mettere a punto nuovi metodi e strumenti d'indagine particolarmente utili per lo studio, il monitoraggio, la diagnostica, la valorizzazione e la conservazione del patrimonio storico-artistico oltre che per una fruizione delle opere d'arte che permetta di apprezzarle digitalmente in tutta la loro bellezza e magnificenza come solo una visione ravvicinata delle stesse consente di fare o come solo l'artista poteva usufruirne nel momento stesso della loro realizzazione. In particolare, l'importanza delle nuove tecnologie applicate al campo dei beni culturali si sta manifestando in maniera sempre più evidente fornendo un valido supporto agli esperti del settore (storici e critici d'arte, restauratori, ecc.) come strumento in grado di acquisire informazioni e dati fondamentali che possono essere integrati con quelli prodotti con le tecniche e i metodi tradizionali di indagine per uno studio multidisciplinare e per una più completa e approfondita analisi e conoscenza del bene artistico-culturale investigato.

In tale contesto si pensi al ruolo fondamentale ricoperto dalla tecnologia nel campo dell'imaging e della digitalizzazione 3D delle opere d'arte [2], che permette di renderle accessibili e fruibili su PC, dispositivi mobili (iPhone tablet, smartphone, ecc.) e schermi 3D ad alta definizione, incluse anche quelle non trasportabili oppure difficilmente accessibili, collocate in altro sito. Si pensi altresì alla possibilità di realizzare dei musei e gallerie virtuali sfruttando le riproduzioni digitali delle opere d'arte [3] che possono così essere visitabili e fruibili attraverso il web anche da un pubblico che si trova in luoghi molto lontani rispetto al sito dove le opere effettivamente si trovano. Si pensi anche alla possibilità per gli esperti del settore di sfruttare i dati e le informazioni messi a disposizione dalla tecnologia per effettuare studi di carattere oggettivo sullo stato di conservazione di un'opera d'arte e approfondirne la conoscenza con l'ausilio di software appositamente sviluppati. Questo può essere fatto senza doversi recare necessariamente sul posto ove è ubicata l'opera e senza dover ricorrere, quando necessario, ad ingombranti e costose impalcature/ponteggi per una visione diretta e ravvicinata del bene artistico investigato, che è comunque soggettiva.

Il caso di studio presentato in questo lavoro è il frutto di una collaborazione tra il laboratorio DIM (Diagnostica e Metrologia) della divisione TECFIS (Tecnologie Fisiche per la sicurezza e la salute) appartenente al dipartimento NUC (Nucleare) del centro di ricerche ENEA di Frascati (Roma), specializzato nella progettazione e nello sviluppo di sensori laser nei differenti campi applicativi del monitoraggio ambientale, dello spazio, della sicurezza (anche in ambienti ostili), della protezione della salute dei cittadini e delle diagnostiche per il campo dei beni culturali, e il dipartimento di storia dell'arte dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata in cui è coinvolta parte dell'attività formativa della Dr.ssa Claudia Cianfriglia, studentessa del XXXVIII ciclo di Dottorato in Studi Comparati: Lingue, Letterature e Arti. Tale collaborazione s'inserisce nell'ambito della convenzione Quadro stipulata tra le università e i centri di ricerca nazionali, tra cui l'ENEA. Essa rappresenta un esempio di studio multidisciplinare che nasce dalla sinergia di enti e saperi diversi il cui sforzo comune è finalizzato, nel caso specifico considerato, all'indagine e al monitoraggio diagnostico delle antiche pitture murali conservate nella basilica paleocristiana di San Clemente a Roma, sito fondamentale per la

comprensione della *facies* altomedievale della città, ma il cui stato di conservazione ha causato notevoli problemi interpretativi.

Nel presente progetto di collaborazione e studio si è dunque deciso di dividere la ricerca in due fasi di lavoro, strettamente interconnesse tra loro. La prima ha riguardato la ricerca storico-artistica più tradizionale che ha restituito informazioni fondamentali circa l'estensione, le interpretazioni dei temi iconografici e del linguaggio formale che caratterizzano la campagna decorativa più antica conservata all'interno della basilica paleocristiana; si è così potuto procedere ad individuare e selezionare quelle pitture murali che non era possibile indagare attraverso l'osservazione diretta e le ricerche storico-artistiche tradizionali. La seconda fase del progetto si è, invece, focalizzata sullo svolgimento di analisi laser nella regione spettrale dell'infrarosso attraverso l'utilizzo del sistema ENEA prototipale di laser scanner IR-ITR (Infrared Imaging Topological Radar) [4] con lo scopo di restituire leggibilità a pitture dall'elevato interesse artistico e storico, talvolta caratterizzate da un cattivo stato di conservazione, e di individuare l'eventuale presenza di dettagli nascosti al di sotto dello strato pittorico superficiale non visibili ad occhio nudo o con tecniche operanti nel visibile.

Più precisamente, nel lavoro si presentano i risultati ottenuti durante la campagna di misure effettuata dal 16 al 27 ottobre 2023 nella basilica paleocristiana di San Clemente che ha visto il sistema laser scanner IR-ITR come protagonista per la digitalizzazione e l'analisi IR di alcune delle pitture murali altomedievali di maggior interesse ivi conservate, e più nello specifico quelle sul muro perimetrale nord (in corrispondenza dell'iscrizione *picta* di *Johannes*, dei resti della fila di santi già ivi individuata da Wilpert e delle aree a destra e a sinistra della nicchia), sulla parete di controfacciata della navata sinistra (ciclo dipinto con storie del monaco Liberto) e sulla parete di fondo della stessa navata (pitture dal soggetto di incerta identificazione e scena di battesimo) (Figura 1).

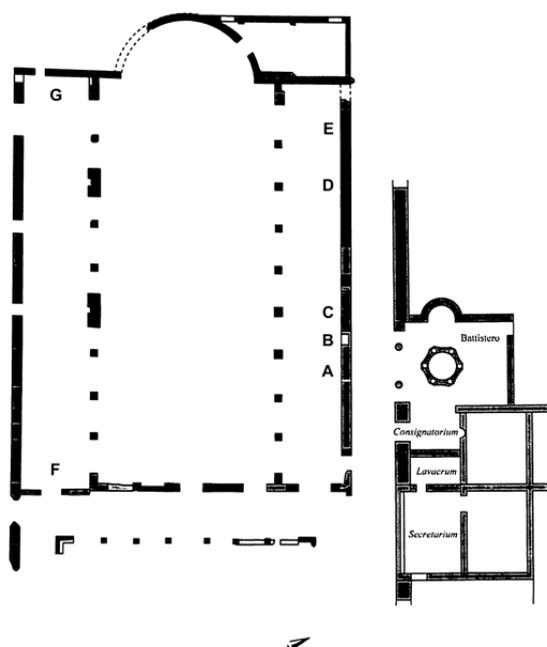


Figura 1. Pianta della basilica paleocristiana di San Clemente con le posizioni delle pitture analizzate: A scena dei Dannati; B nicchia con pitture della Madonna Regina e sante; C scena dei Beati; D resti della fila di santi; E iscrizione *picta* di *Johannes*; F ciclo del monaco Liberto; G scena di battesimo e altre di incerta identificazione¹ (la freccia indica il nord).

¹ Pianta originale da F. Guidobaldi, "S. Clemente", in *Corpus Architecturae Religiosae Europaeae* (saec. IV-X), Vol. II: Italia, 2a. Roma entro le mura, Regione I-IV, Zagreb - Città del Vaticano, 2019, 201 - 237, Figura 233, con successiva rielaborazione da parte degli autori.

2. OGGETTO DELLA RICERCA: LE PITTURE ALTOMEDIEVALI NELLA BASILICA PALEOCRISTIANA DI SAN CLEMENTE A ROMA

Quello di San Clemente è un sito stratificato, articolato su tre livelli: quello più antico è occupato da edifici di epoca romana; sopra a questi, agli inizi del V secolo venne costruita una basilica cristiana che rimase in uso fino agli inizi del XII secolo, quando quella antica venne interrata e ad un livello più alto si costruì una nuova basilica, ancora oggi in uso [5]. La basilica paleocristiana (V-XII secolo), oggi visitabile negli ambienti sotterranei di San Clemente, occupò una posizione strategica nella Roma altomedievale: vicina alla basilica lateranense, *statio* della processione pasquale, oggetto d'interesse da parte di diversi pontefici che a più riprese vi promossero interventi di restauro e donazioni. Le uniche vestigia di questo antico splendore ancora visibili *in situ* consistono nelle pitture murali, che non poterono essere trasferite nella nuova basilica quando quella antica venne abbandonata.

Quanto sopravvissuto costituisce un insieme di soggetti per un verso piuttosto frammentari, cioè non spiegabili con un unico progetto; e per un altro, si tratta in buona misura di soggetti rari. Queste pitture testimoniano quindi una serie di tappe decorative, che interessarono gli spazi della basilica fra l'VIII e l'XI secolo; un *ante quem* per questa più antica fase decorativa è costituito dai celebri affreschi realizzati negli ultimi decenni dell'XI secolo sopra i muri di tamponamento del narcece e del colonnato sud della basilica, nei quali sono rappresentate le storie di San Clemente e Sant'Alessio [6]. Questi affreschi più tardi hanno incontrato l'interesse degli studiosi dalla loro scoperta fino ad oggi; meno studiati, tuttavia anche gli affreschi altomedievali meritano una nuova indagine attraverso i metodi scientifici, la tecnologia e la strumentazione a nostra disposizione. Un nuovo studio sugli affreschi altomedievali appare inoltre urgente alla luce dell'avanzato stato di degrado in cui versano, inquadrato in un'attività di indagine diagnostica degli stessi, anche in risposta all'azione di oscuramento esercitata dalla storiografia dello scorso secolo sulla produzione pittorica romana tra il IX e l'inizio dell'XI secolo, parentesi cronologica in cui si inseriscono molti degli affreschi più antichi della basilica paleocristiana di San Clemente.

3. STATUS QUESTIONIS E OBIETTIVI DELLE NUOVE INDAGINI

Dopo il primo resoconto circa le pitture della basilica paleocristiana redatto dal priore domenicano Mullooly nel lontano 1868 [7], e le descrizioni degli affreschi pubblicati in vari numeri del *Bullettino di Archeologia Cristiana* da De Rossi [8], che partecipò alle fasi di scavo della basilica sotterranea, una nuova descrizione degli affreschi è proposta all'inizio del secolo scorso da Joseph Wilpert [9], il quale avanza per molti affreschi nuove interpretazioni circa i soggetti rappresentati². Nella prima metà del '900 altri studiosi si interessano alla descrizione delle pitture della basilica paleocristiana: Nolan pubblica la sua monografia nel 1910 [10], e più tardi Cecchelli, nel 1930, dedica alla basilica un volume della collana *Le chiese di Roma illustrate* [11].

L'interesse per le pitture di San Clemente continua nella seconda metà dello scorso secolo: si ricordano a tal proposito i riferimenti agli affreschi altomedievali fatti da Matthiae nel lavoro del 1965 [12], lo studio proposto da Eileen Kane nel secondo volume della *San Clemente Miscellany* [13], e gli studi condotti da Andaloro nel successivo aggiornamento all'opera dello stesso Matthiae [12]. Una ricerca innovativa, nel frattempo, era stata condotta da John Osborne per la sua tesi di dottorato

² A dare inizio ai lavori di sterro fu allora priore domenicano Joseph Mullooly, il quale nel 1857 riuscì a penetrare gli ambienti della basilica paleocristiana; l'attività del priore si svolse in parte in modo parallelo agli scavi guidati dall'archeologo Giovan Battista De Rossi, che era stato incaricato da papa Pio IX della ricerca della originaria sepoltura di san Cirillo. Circa mezzo secolo dopo il completamento degli scavi, nuove ricerche furono condotte dallo studioso tedesco Joseph Wilpert, che nella sua monumentale pubblicazione sulle pitture e gli affreschi altomedievali di Roma incluse pure delle foto acquerellate delle pitture rinvenute a San Clemente.

pubblicata nel 1984 [14]: lo studioso propone di identificare la posizione della tomba di San Cirillo a destra dell'abside, nei pressi dell'affresco dell'*Anastasis*, suggerendo in alcuni casi interpretazioni nuove dei soggetti rappresentati negli affreschi altomedievali. Dopo il lavoro di Osborne nuove sintesi circa gli affreschi e la posizione della tomba di san Cirillo vengono proposte da Guidobaldi nel 1992 [5] e, per ultima, da Bordi nella scheda per l'*Atlante*, pubblicato nel 2006 [15]. Queste antiche testimonianze pittoriche non sono, dunque, sconosciute, ma l'avanzato stato di degrado in cui versavano già dal momento della loro scoperta nella seconda metà del XIX secolo ha creato non pochi problemi di interpretazione iconografica e di inquadramento stilistico e cronologico. Si è, quindi, deciso di supportare la ricerca storico-artistica tradizionale con nuovi sistemi d'indagine messi a disposizione dall'ENEA e, in particolare, dal laboratorio DIM.

Questa collaborazione multidisciplinare mira ad una nuova analisi e a uno studio oggettivo degli affreschi attraverso metodi e strumenti d'indagine all'avanguardia, ad alta risoluzione, non invasivi e non distruttivi, rappresentati nello specifico dal sistema laser scanner IR-ITR. Gli scopi di tale analisi sono quelli di individuare la possibile presenza di disegni e di incisioni preparatorie (ovvero dettagli nascosti), di restituire informazioni utili circa l'eventuale sovrapposizione di strati pittorici e di migliorare la leggibilità di affreschi il cui stato di conservazione non è ottimale al fine di consentire un recupero degli stessi, almeno dal punto di vista digitale, permettendo tra le altre cose anche di osservare dettagli che non sono più ben visibili ad occhio nudo.

L'obiettivo principale di questa nuova analisi è quello di chiarire le posizioni, talvolta contraddittorie, assunte negli studi fin qui condotti riguardo l'interpretazione dei soggetti delle pitture più antiche di San Clemente. A tal proposito si citano gli affreschi sulla parete di fondo della navata laterale sinistra (Figura 2), vicino l'abside, oggetto di ben quattro interpretazioni diverse riguardo il soggetto rappresentato: Mullooly interpreta le pitture come storie della vita di san Cirillo e da questa lettura deriva pure l'identificazione di questo spazio della basilica nel luogo che ospitò la venerata sepoltura del santo, sepolto a San Clemente nella seconda metà del IX secolo. Più tardi Wilpert interpreta il pannello come una scena di concordanza tra Antico e Nuovo Testamento. Negli anni '80 del secolo scorso Osborne ritiene che il pannello raffiguri il martirio di una santa femminile, Cirilla, le cui storie erano state dipinte pure nel nartece pelagiano della basilica di San Lorenzo fuori le mura. In tempi più recenti Bordi ha attribuito alle pitture un'interpretazione ancora diversa, vedendovi rappresentate scene del martirio di santa Cecilia e dei santi Tiburzio e Valeriano. Il problema alla base di letture così diverse può essere individuato nella ridipintura del pannello operata pochi anni dopo la riscoperta della basilica paleocristiana³. Le nuove indagini laser ad infrarosso con sistema IR-ITR mirano, tra le altre cose, alla restituzione, anche parziale, del possibile disegno preparatorio o dell'iscrizione *picta*, permettendo così una più certa identificazione dei personaggi che compaiono nel pannello oppure al restringimento delle ipotesi in campo.

Anche per le pitture il cui soggetto sia riconosciuto come certo, un'indagine più approfondita può rivelare dettagli finora non considerati. Un caso esemplare è rappresentato dagli affreschi che si trovano nella navata destra della basilica paleocristiana, ai lati della nicchia (Figura 3, Figura 4), che sono stati oggetto di studio della ricerca della Dr.ssa Claudia Cianfriglia per la tesi di laurea magistrale (anno accademico 2020-2021) [16]: dopo la proposta avanzata da Joseph Wilpert, che interpretò questi affreschi come una rappresentazione del Giudizio universale, non erano state avanzate nuove letture circa i soggetti rappresentati, complice l'avanzato stato di deterioramento in cui versano queste pitture. Eppure, i pannelli in questione costituiscono l'esempio più antico di rappresentazione del tema del Giudizio conservato a Roma in contesto monumentale. Le analisi laser nell'infrarosso

³ Osborne 1984 [14], 151.

condotte in questa zona hanno lo scopo di migliorare la leggibilità dei lacerti sopravvissuti e di restituire ulteriori dettagli che permettano di meglio identificare, sia dal punto di vista iconografico che stilistico, la scena qui rappresentata.



Figura 2. Parete di fondo e pareti laterali della navata sinistra, terminazione absidale (© Domenico Ventura).



Figura 3. Muro perimetrale nord, navata destra, pannello con i Beati a sinistra della nicchia (© Domenico Ventura).



Figura 4. Muro perimetrale nord, navata destra, pannello con i Dannati a destra della nicchia (© Domenico Ventura).

Ancora sul muro perimetrale della navata destra Wilpert vide resti di pitture riferibili ad una lunga fila di santi (Figura 5). Queste pitture oggi non sono sopravvissute (Figura 6), ma l'individuazione della figura di sant'Antimo da parte dello studioso tedesco merita un'analisi più approfondita nella zona corrispondente della parete, al fine di confermare o escludere la sopravvivenza di altre figure di santi e poter così ragionare sullo schema generale che ha interessato la campagna pittorica che ha riguardato la navata destra della basilica.



Figura 5. Muro perimetrale nord, navata destra, resti della fila di santi tra cui sant'Antimo. Foto acquerellata da J. Wilbert [9].



Figura 6. Muro perimetrale nord, navata destra, lacerti pittorici riferibili alla fila di santi di cui Figura 5 (© Domenico Ventura).

Sulla stessa parete (sul tratto più vicino all'abside) si trovano pitture su più livelli d'intonaco (Figura 7). In questa posizione è conservata parte di un'iscrizione riferita ad un personaggio di nome *Johannes* e di cui si conservano pochissime parti leggibili: è dunque fondamentale ricorrere alle scansioni laser ad infrarosso applicandole a questa iscrizione *picta*, già frammentaria al tempo della sua scoperta, con la prospettiva di raccogliere ulteriori dettagli funzionali ad una migliore comprensione dei tempi, degli intenti e dell'identità dei committenti coinvolti nella realizzazione della pittura di riferimento.



Figura 7. Muro perimetrale nord, navata destra terminazione absidale, resti pittorici con iscrizione *picta* di *Johannes* (© Domenico Ventura).

L'ultima zona di interesse è costituita dal pannello con le storie del monaco Libertino posto sulla parete di controfacciata della navata sud della basilica (Figura 8): queste pitture sono oggi ingiudicabili, ridotte a deboli lacerti, e dovevano versare in un avanzato stato di degrado già quando furono scoperte, dal momento che l'allora priore Mullooly ne commissionò un restauro all'acquerellista William Ewing⁴. Ulteriori analisi laser nell'infrarosso condotte su queste pitture potrebbero permettere di ricostruire la *facies* antica del ciclo e distinguere con maggiore chiarezza le aree originali da quelle interessate dalla più tarda manipolazione.

Fare chiarezza su queste letture significa aprire la porta ad una molteplicità d'informazioni: la possibilità di individuare un committente, comprendere la destinazione d'uso dello spazio antistante gli affreschi e stringere i limiti dell'inquadramento cronologico per la realizzazione degli affreschi stessi.

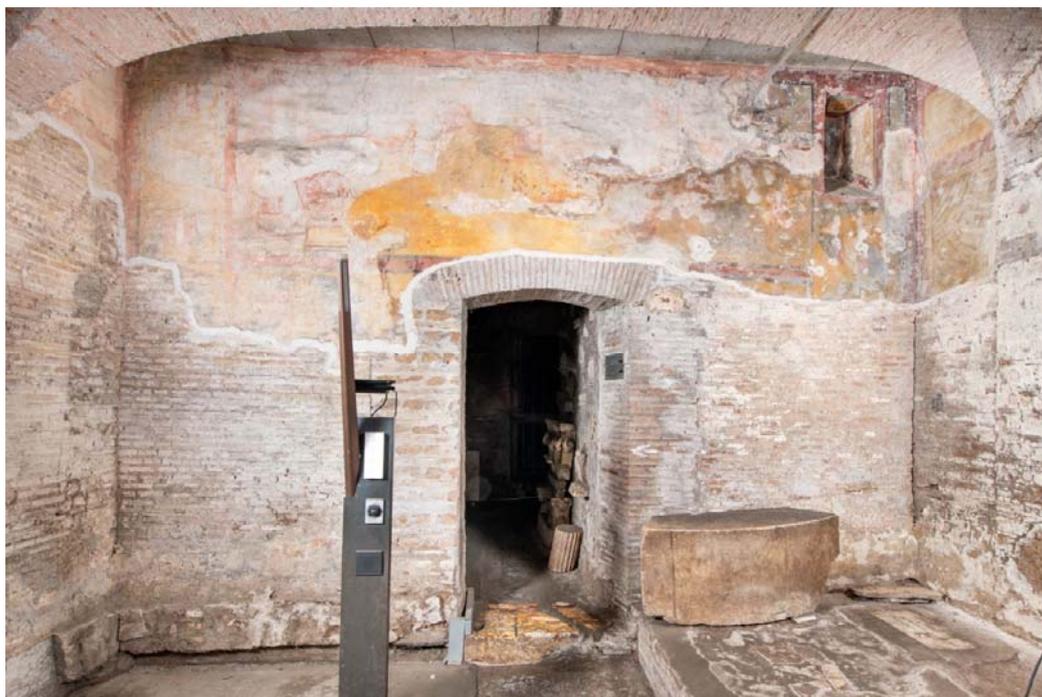


Figura 8. Parete di controfacciata, navata sinistra, ciclo pittorico dedicato al monaco Libertino (© Domenico Ventura).

Per le ragioni sopra esposte, si è deciso di tracciare una mappa di punti d'interesse (Figura 1) all'interno della basilica paleocristiana, rappresentati dalle pitture in più avanzato stato di degrado, da quelle di più incerta interpretazione e infine da quelle su cui siamo certi siano stati applicati interventi invasivi di restauro negli anni successivi alla loro scoperta. Su queste aree si è deciso di svolgere delle analisi diagnostiche non invasive e non distruttive con sistema laser scanner IR-ITR estendendo l'area d'indagine anche alle zone limitrofe, con l'obiettivo di restituire un'affidabile e oggettiva lettura di scene ampie i cui dettagli potevano essere sfuggiti all'attenzione degli studi precedenti a causa dell'avanzato stato di degrado.

4. SISTEMA LASER SCANNER IR-ITR OPERANTE NELL'INFRAROSSO

Tra le nuove tecnologie sviluppate per la digitalizzazione dei beni artistici e culturali per scopi di fruizione, catalogazione, archiviazione digitale, divulgazione, studi diagnostici, tutela e valorizzazione spiccano quelle per l'imaging 3D, tra le quali ricoprono un ruolo importante quella fotogrammetrica

⁴ Osborne 1984 [14], 147.

basata su tecnica passiva [17, 18, 19] e quella laser scanner basata su tecnica attiva [20, 21, 22], tra cui quella a modulazione d'ampiezza (Amplitude Modulation, AM)[23, 24].

Tra le due tecniche citate quest'ultima è quella che consente di ottenere i risultati migliori nella riproduzione digitale di un'opera d'arte in termini di realismo, risoluzione e qualità del modello finale. Essa consente di "visitare" in modo virtuale un'opera con un elevato grado di accuratezza/risoluzione, di indagarla e osservarla nella sua reale conformazione spaziale e colorimetrica, trasladandola, ruotandola, ingrandendola o rimpicciolendola a piacimento con un semplice movimento del mouse, fino ad apprezzarla nel suo insieme o nel suo più minuto particolare ad elevato grado di risoluzione spaziale (minimo dettaglio apprezzabile, che può essere inferiore al mm), accuratezza e fedeltà. In questo modo l'importanza del ruolo della tecnologia nel campo dei beni culturali appare evidente potendo così essere proficuamente utilizzata al servizio e a tutela del patrimonio storico-artistico [25, 26, 27, 28, 29]. In questo contesto, considerato l'avanzato stato di degrado in cui versano le pitture altomedievali della basilica paleocristiana di San Clemente, si è così deciso di svolgere analisi ad alta risoluzione, non invasive e non distruttive, non impattanti sul loro stato conservativo, e più nello specifico di procedere nel campo dei sistemi laser scanner che utilizzano radiazione infrarossa per studi di riflettografia IR, con lo scopo di restituire la lettura in profondità dello spessore dell'intonaco dipinto e di migliorare la leggibilità di pitture in cattivo stato di conservazione o di interpretazione incerta al fine recuperare le opere digitalmente mostrandone dettagli che non sono più ben visibili ad occhio nudo e/o di dare loro la corretta interpretazione storico-artistica.

A tale scopo lo strumento che si è quindi deciso di utilizzare è l'IR-ITR (InfraRed Imaging Topological Radar, Figura 9)[4, 29, 30, 31].



Figura 9. Sistema ENEA di laser scanner prototipale IR-ITR in azione durante la campagna di misure nella basilica paleocristiana di San Clemente (Roma). La parte ottica è visibile in primo piano montata su treppiedi. La parte elettronica è visibile in secondo piano ed è contenuta in due scatole "avionica". La fase di scansione e acquisizione dati è gestita da un laptop mediante software custom copyrighted.

L'IR-ITR rappresenta l'ultima versione dei prototipi di laser scanner ITR sviluppati nel Centro di Ricerche ENEA di Frascati (Roma) presso il laboratorio DIM. Opera con una sorgente laser nell'infrarosso a una lunghezza d'onda di 1550nm modulata in ampiezza ad una frequenza di 300kHz. Lo strumento è in grado di registrare con elevata affidabilità soltanto le informazioni sulla riflettività IR del target investigato lavorando con un basso valore della frequenza di modulazione.

Il sistema ha trovato la sua principale applicazione nel campo dei beni culturali ed è in grado di produrre immagini di riflettografia infrarossa di opere d'arte anche di grandi dimensioni con una massima risoluzione dell'ordine dei Giga Pixel e con risoluzione spaziale dell'ordine del millimetro fino a 5m di distanza. L'IR-ITR è caratterizzato da un campo di vista di $80^\circ \times 310^\circ$. Opera da terra con una velocità massima dei motori di scansione di $20^\circ/s$ in un range di lavoro compreso tra 2m e 10m senza bisogno di ricorrere all'impiego di impalcature/ponteggi e può funzionare di giorno e di notte (h24) fornendo gli stessi risultati. La sua massima velocità di campionamento è di 10000 punti al secondo mentre la sua massima risoluzione angolare, corrispondente allo step angolare dei motori di scansione, è di $0,002^\circ$.

Grazie all'elevata risoluzione spaziale delle immagini IR che lo strumento restituisce è possibile raggiungere livelli di zoom molto spinti senza perdere in risoluzione. Le immagini prodotte non sono influenzate dalle condizioni di illuminazione esterna, non presentano ombre e le distorsioni sono minimizzate. L'opera d'arte investigata non corre alcun rischio di danneggiamento durante la fase di scansione che avviene a distanza senza contatto fisico e con una potenza del fascio laser di circa 10mW.

Sfruttando la maggiore capacità di penetrazione della radiazione infrarossa a 1550nm rispetto a quella visibile, la caratteristica principale di questo strumento è la possibilità di riuscire a rilevare e ad evidenziare la presenza di ripensamenti/correzioni dell'artista, bozzetti preparatori, firme o dettagli nascosti presenti al di sotto dello strato pittorico superficiale fino ad una distanza di 10m. Inoltre, grazie alla possibilità di ottenere immagini IR con un buon grado di contrasto, l'IR-ITR consente di poter effettuare analisi approfondite delle opere investigate mediante post-processing dei dati acquisiti volte al recupero di quelle in avanzato stato di degrado e di dettagli non più ben visibili ad occhio nudo o di aree di particolare interesse di interpretazione incerta, migliorandone così la leggibilità e favorendone la corretta interpretazione storico-artistica.

La parte software dello strumento è custom e copyrighted. È composta da due interfacce principali sviluppate in ambiente MATLAB: la prima, denominata ScanSystem, controlla gli aspetti della scansione e dell'acquisizione dei dati consentendo la gestione dello strumento da remoto; la seconda, denominata ITRAnalyzer, è in grado di leggere i dati acquisiti in formato binario e di elaborarli per costruire il modello digitale dell'oggetto investigato. ITRAnalyzer permette anche di effettuare opportune operazioni di post-processing per migliorare la qualità dei risultati ottenuti e di esportare il modello nei formati dei files più comuni che sono leggibili dai software commerciali di imaging.

Più precisamente, ScanSystem consente di impostare e modificare i parametri di scansione dello strumento in modo da garantire la soluzione migliore/ottimale durante la fase di misura. L'interfaccia per utente del software è suddivisa in varie sezioni, tra cui troviamo quella "Motion Controller" che permette di pilotare lo specchio di scansione per muovere il fascio laser all'interno dell'area di scanning/acquisizione. Quest'ultima, a sua volta, può essere impostata nella sezione "Scan Parameters" con la scelta di appositi parametri. La sezione "Acquisizione" è usata, invece, per impostare la frequenza di modulazione della sorgente laser, alcuni filtraggi (tra cui quelli relativi al guadagno), la frequenza di campionamento dello strumento, lo step angolare (ovvero la risoluzione angolare), la velocità e l'accelerazione massime dei motori di scansione. La fase di acquisizione viene avviata premendo il pulsante "Start Scan" presente nell'interfaccia per utente. Un'altra interessante

caratteristica di ScanSystem, dove è presente anche una sezione per la calibrazione del colore, risiede nella programmazione sotto forma di SCRIPT che permette di suddividere il processo di acquisizione in diverse subscansioni, ottenendo così una personalizzazione dei parametri di scansione in base alla complessità del target investigato, alle dimensioni dell'area da scansionare, alla risoluzione desiderata e al tempo a disposizione per l'acquisizione.

ITRAnalyzer gestisce, invece, tutti i dati raccolti dal sistema laser scanner, i profili strutturali del target indagato, la relativa texture (ovvero, nel nostro caso specifico, l'immagine di riflettografia infrarossa) e permette, se necessario, la registrazione di mesh ottenute da scansioni effettuate da punti di vista diversi. Questo software può essere considerato il collegamento tra i dati grezzi raccolti dal laser scanner e i software commerciali per la modellazione e la manipolazione della texture/mesh. Anche l'interfaccia per utente di ITRAnalyzer è composta da varie sezioni, tra cui quella chiamata "Building Settings" che permette di impostare la tipologia di algoritmi da attivare per l'elaborazione prima del caricamento dei dati acquisiti. La sezione "2D View" consente invece di visualizzare alcune anteprime delle informazioni acquisite dallo strumento come, ad esempio, l'immagine IR del target considerato. Nell'interfaccia per utente è prevista anche la presenza della sezione "3D View" per la visualizzazione di modelli tridimensionali (mesh 3D). Infine, la sezione "Data Analysis" è utilizzata per un'elaborazione preliminare dei dati acquisiti dallo strumento, che può essere poi integrata e completata mediante il ricorso a software di analisi commerciali dopo aver esportato i risultati ottenuti in formati leggibili da tali software.

Le aree di maggiore interesse della basilica paleocristiana di San Clemente su cui si è concentrata l'attività di scansione e indagine dell'IR-ITR sono le seguenti: (a) la parete perimetrale nord nella sua interezza; (b) la navata sud, parete di controfacciata su cui si dispiega il ciclo dipinto con storie di Libertino; (c) pareti vicino l'abside nella stessa navata sud, dove si trovano scene dipinte di interpretazione cronologica e iconografica incerta.

5. RISULTATI DELLE MISURE CON SISTEMA LASER SCANNER IR-ITR A SAN CLEMENTE

Nel periodo della campagna di misure (16 - 27 ottobre 2023) sono state svolte scansioni laser nell'IR ad alta risoluzione (minimo dettaglio apprezzabile dell'ordine del mm) negli ambienti sotterranei della basilica paleocristiana di San Clemente⁵. Il sistema IR-ITR, messo a disposizione dall'ENEA per indagini di riflettografia infrarossa, è stato dapprima impiegato nella digitalizzazione delle pitture murali della navata destra collocandolo in quattro diverse posizioni che consentissero di acquisire nel modo migliore possibile le opere di interesse per ottimizzare la fase di acquisizione.

Più precisamente in quest'area, da queste quattro posizioni, lo strumento ha permesso di scansionare sei distinti pannelli dipinti: la pittura con i Dannati a destra della nicchia; quella nella parte bassa della parete a sinistra della nicchia su cui rimangono tracce del velario dipinto; l'area in alto dello stesso tratto murario con i Beati nella Città Celeste; pitture all'interno della nicchia sulla cui parete di fondo si trova l'immagine di Maria Regina con il Bambino; lacerti della fila di santi che include pure la figura di sant'Antimo; infine l'iscrizione *picta* con il nome di *Johannes*, posizionata vicino alla terminazione absidale della parete.

⁵ Al fine di verificare il corretto funzionamento dell'IR-ITR all'inizio della campagna di misure, dopo averlo messo in opera e averne ottimizzato l'allineamento ottico per massimizzare il rapporto segnale/rumore, è stata effettuata una scansione di prova a bassa risoluzione della durata di circa 1 ora e 30 minuti che ha interessato l'area in alto a destra del pannello dei Dannati del Giudizio finale sul muro perimetrale nord. L'immagine finale, ottenuta con una spot laser di circa 1mm da una distanza compresa tra 4m e 7m e formata da 1626 x 1651 pixel, ha consentito di verificare il corretto funzionamento dello strumento.

Successivamente l'indagine laser si è concentrata sul lato opposto della basilica collocando lo strumento nella navata sinistra. L'IR-ITR è stato inizialmente posizionato nell'area antistante la controfacciata per acquisire in modo ottimale sia i velari dipinti sulla parte bassa della parete che le zone superiori in cui si sviluppa il ciclo pittorico dedicato al monaco Liberto.

Infine la strumentazione è stata posizionata sul lato opposto della stessa navata, nell'area più vicina all'abside, per acquisire le immagini dei lacerti riferibili alla scena di battesimo e di altre di identificazione iconografica incerta.

Durante le scansioni alcuni parametri di misura sono stati mantenuti invariati mentre altri sono stati cambiati. Per quanto riguarda i primi, tutte le acquisizioni sono state effettuate con risoluzione angolare, corrispondente allo step dei motori verticale e orizzontale di scansione, di $0,008^\circ$, velocità e accelerazione massime di questi ultimi rispettivamente di $10^\circ/s$ e $40^\circ/s^2$, dimensione della spot su target di circa 1 - 2 mm, frequenza di campionamento (sampling rate) di 1000 punti/s, velocità per ogni singola riga acquisita di $4^\circ/s$, frequenza di modulazione e potenza ottica della sorgente laser operante a 1550nm rispettivamente di 300kHz e di 10mW, segnale massimo misurato su target bianco di riferimento a 4m di 10mV e rumore elettronico massimo di 10 μ V da cui discende un rapporto segnale/rumore (signal to noise ratio S/N) massimo di 1000.

Un primo interessante risultato, che mostra in maniera molto evidente un'importante caratteristica delle immagini IR-ITR, è particolarmente apprezzabile in Figura 10 dove sono mostrate le immagini fotografica e laser che includono la nicchia e la scena di Giudizio a destra di quest'ultima. Il confronto dimostra in modo chiaro l'indipendenza delle immagini IR-ITR dalle condizioni di illuminazione ambientale. Infatti, l'immagine fotografica, scattata dalla stessa distanza da cui è stata effettuata la scansione laser dell'area di interesse, presenta colori alterati dall'illuminazione ambientale, zone più in ombra di altre che invece risultano maggiormente illuminate e, in particolare, un'area (quella della nicchia) quasi totalmente accecata dalla luce proveniente da una lampada posta a ridosso della nicchia stessa.



Figura 10. Confronto tra immagine fotografica (sinistra) e immagine IR-ITR (destra) del tratto di parete che include la nicchia e il pannello dipinto alla sua destra con scena dei Dannati.

Nell'immagine laser questo effetto di accecamento da parte della lampada di illuminazione non si osserva nell'area della nicchia, le cui pitture murali risultano essere perfettamente visibili nella loro interezza, non si osservano zone di ombra e il livello di qualità/risoluzione spaziale raggiunto (a parità di distanza di lavoro) è superiore a quello dell'immagine fotografica con la possibilità di mostrare dettagli non osservabili in maniera così evidentemente con tecnica fotografica o ad occhio nudo.

L'immagine laser è formata da 5626 x 8251 pixel ed è stata ottenuta con una scansione della durata di circa 20 ore da una distanza media di circa 4m con risoluzione spaziale media dell'ordine di 1mm. Sulla stessa parete in corrispondenza delle pitture con fila di santi (o meglio quel che ne resta a causa del cattivo stato di conservazione) è stata acquisita un'immagine laser di 4876 x 3876 pixel con una scansione della durata di 9 ore da una distanza media di circa 3,7m con risoluzione spaziale media dell'ordine di 1mm. L'immagine così ottenuta è stata messa a confronto con la fotografia della medesima area (Figura 11). Da tale analisi è emersa una migliore leggibilità della figura del santo restituita dall'immagine laser rispetto a quella fotografica grazie al maggior livello di contrasto e risoluzione ottenibili con IR-ITR. La diretta conseguenza di ciò è una migliore fruizione e leggibilità tanto per il pubblico interessato quanto per gli esperti del settore (storici e critici d'arte, restauratori, ecc.) di pitture che si trovino in una forte condizione di degrado. L'analisi IR-ITR permette un parziale recupero di queste pitture anche per poterne effettuare uno studio diagnostico in previsione di un monitoraggio nel tempo dello stato di conservazione che consenta di valutare le inevitabili alterazioni della pellicola pittorica (analisi differenziale).



Figura 11. Confronto tra immagine fotografica (sinistra, © Domenico Ventura) e immagine IR-ITR (destra) del tratto di muro perimetrale nord corrispondente alla figura di sant'Antimo, un tempo inserita in una più estesa fila di santi (supra Figura 5).

I pannelli dipinti sottoposti a restauri ottocenteschi (il ciclo pittorico del monaco Libertino e le scene di interpretazione iconografica controversa, entrambi nella navata sinistra) sono stati opportunamente indagati con lo scopo di raggiungere la pellicola pittorica originale ipoteticamente conservata sotto le ridipinture moderne.

Le immagini ottenute con IR-ITR tuttavia non hanno restituito informazioni utili a ricomporre la *facies* originale delle pitture murali. La motivazione di ciò potrebbe essere attribuita all'assenza del substrato pittorico originale ormai completamente deteriorato o, diversamente, all'eccessivo spessore della ridipintura che potrebbe aver impedito la penetrazione della radiazione laser infrarossa fino al livello pittorico di interesse o allo scarso livello di cooperatività della superficie investigata.

Il fenomeno è ben esemplificato dal confronto tra immagine IR-ITR e immagine fotografica della stessa area in alto a destra della parete di controfacciata con storie di Libertino, interessata da un completo restauro nel corso del XIX secolo (Figura 12).

Come è possibile osservare da questo confronto, sia nella fotografia che nell'immagine laser è restituita esclusivamente la pellicola pittorica ottocentesca.



Figura 12. Confronto tra immagine fotografica (sinistra, © Domenico Ventura) e immagine IR-ITR (destra) dell'area in alto a destra della parete di controfacciata della navata sinistra, motivi decorativi dipinti a destra del ciclo di Libertino. L'immagine IR-ITR è formata da 4189 x 1501 pixel, è stata ottenuta con una scansione della durata di 4 ore da una distanza media di circa 4,7m con risoluzione spaziale media dell'ordine di 1mm.

Diversamente, l'immagine IR-ITR del pannello dei Beati nella navata destra mostra come la radiazione infrarossa sia riuscita a penetrare al di sotto dello strato pittorico superficiale (Figura 13). Infatti, nell'immagine fotografica il volto cerchiato in rosso mostra chiaramente una folta barba rossa che scompare del tutto nella corrispondente immagine laser infrarossa: questo dimostra che la radiazione IR ha raggiunto in questa zona uno strato pittorico sottostante quello della barba e lascia aperta l'ipotesi che alcuni dettagli delle figure siano stati apposti con tecniche pittoriche diverse da quella del livello preparatorio. La capacità della radiazione IR di penetrare al di sotto della pellicola pittorica superficiale è comunque in generale dipendente dalla lunghezza d'onda e dal grado di cooperatività del materiale investigato, in particolare dalla sua capacità di trasmettere la luce infrarossa incidente su di esso che così può essere retrodiffusa dallo strato sottostante evidenziandone gli eventuali particolari presenti o gli aspetti pittorici rilevanti.



Figura 13. Confronto tra immagine fotografica (sinistra, © Domenico Ventura) e immagine IR-ITR (destra) della parte in alto a destra del pannello dei Beati nella navata destra. Cerchiato in rosso il dettaglio del volto con la barba (sinistra) e dello strato preparatorio dello stesso viso senza la restituzione della barba (destra).

In altri casi le immagini IR-ITR hanno permesso di leggere con maggiore chiarezza alcuni dettagli meno visibili ad occhio nudo. Questo dimostra, assieme ai risultati precedentemente discussi, che la capacità di penetrazione della radiazione laser infrarossa con lunghezza d'onda di 1550nm e la possibilità di mostrare dettagli nascosti dipendono dal materiale investigato e dallo spessore dei singoli livelli pittorici.

Il confronto tra immagine fotografica e quella IR-ITR della scena di battesimo sul tratto della parete perimetrale della navata sinistra più vicina all'abside permette di leggere con maggiore chiarezza il pallio vescovile indossato dalla figura sulla sinistra della scena e, in particolare, i dettagli delle croci decorative altrimenti poco visibili nell'immagine fotografica che, invece, risultano ben visibili nell'immagine laser IR caratterizzata da un livello di contrasto superiore rispetto all'immagine fotografica (Figura 14), consentendo così il recupero di elementi dipinti in cattivo stato di conservazione migliorandone la leggibilità.

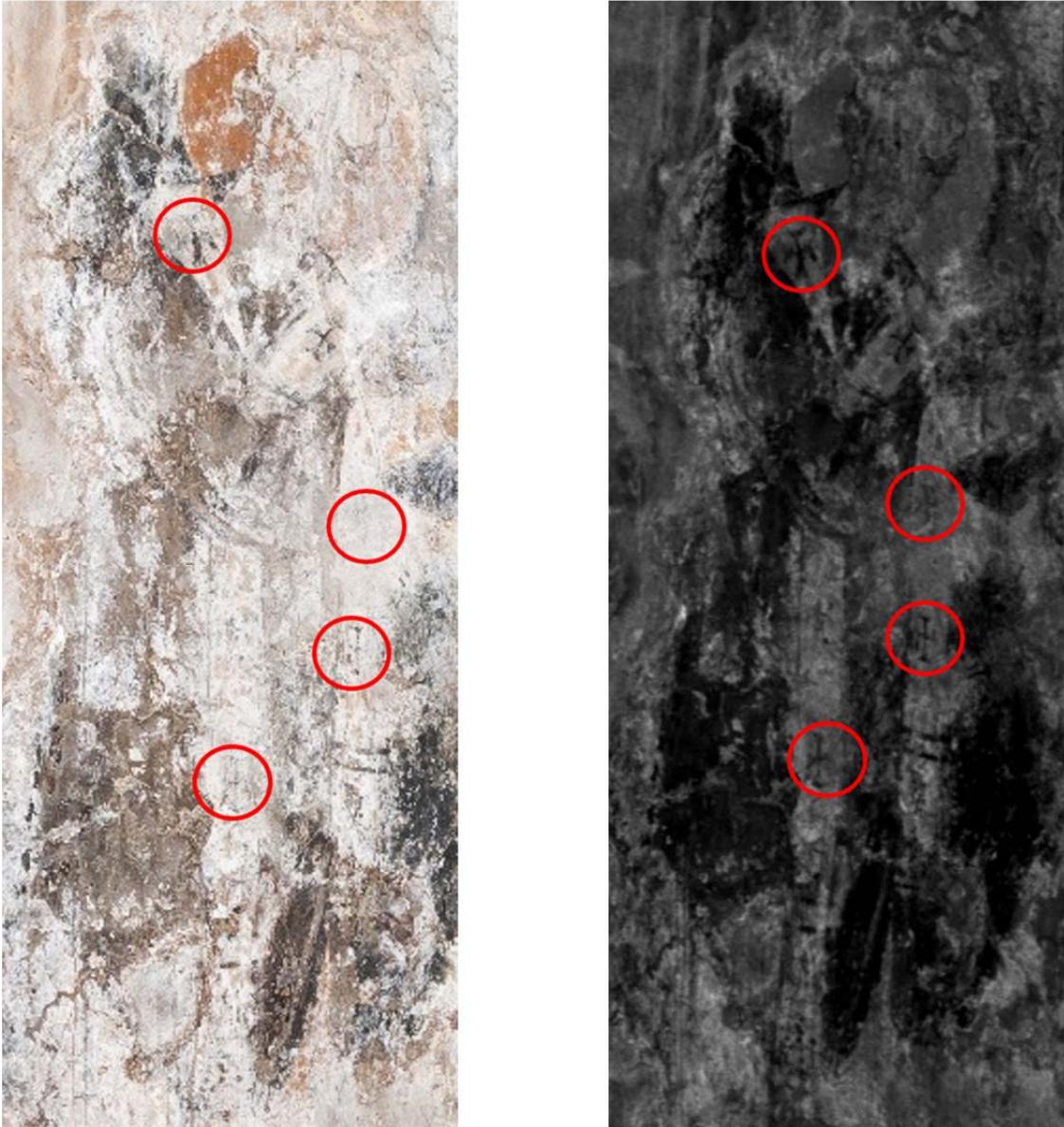


Figura 14. Confronto tra immagine fotografica (sinistra, © Domenico Ventura) e immagine IR-ITR (destra) della scena di battesimo sul muro perimetrale della navata sinistra, nel tratto più vicino all'abside. Cerchiati in rosso i dettagli delle croci che decorano il pallio vescovile della figura a sinistra della scena.

6. CONCLUSIONI

Nell'ambito della collaborazione tra il laboratorio DIM del centro di ricerche ENEA di Frascati e il dipartimento di storia dell'arte dell'Università degli Studi di Roma Tor Vergata, che coinvolge parte dell'attività formativa di dottorato della Dr.ssa Claudia Cianfriglia, il sistema prototipale ENEA di laser scanner IR-ITR è stato impiegato con successo in una campagna di misure per la digitalizzazione e l'analisi nell'infrarosso delle pitture murali altomedioevali di particolare interesse storico-artistico appartenenti al ciclo pittorico della basilica paleocristiana di San Clemente (Roma).

Questo studio è un esempio di applicazione delle nuove tecnologie nel campo dei beni culturali per la loro tutela, conservazione e fruizione oltre che per sviluppare nuove tecniche oggettive di indagine del patrimonio storico-artistico da affiancare a quelle tradizionali, limitate dal fatto di produrre dei risultati soggettivi. Questa strategia è utile per sviluppare metodi e sistemi multidisciplinari di analisi

che consentano di rafforzare il connubio e il sodalizio tra arte e tecnologia e di raggiungere un più alto livello di conoscenza, accessibilità e divulgazione del bene artistico-culturale di interesse.

I risultati ottenuti possono essere utili al pubblico interessato per poter fruire delle opere d'arte investigate in modo digitale e da remoto, oltre che in presenza recandosi sul sito dove l'opera è ubicata. I risultati raggiunti possono anche fornire un valido supporto agli esperti del settore nei loro studi di carattere storico-artistico sulle opere d'arte oggetto d'indagine e per avere a disposizione informazioni e dati fondamentali che possono essere integrati con quelli prodotti da altre tecniche di imaging/indagine (come ad esempio la tecnica LIF, Laser Induced Fluorescence) per una più completa mappatura e uno studio oggettivo più approfondito e dettagliato del bene artistico-culturale investigato.

Dall'analisi delle immagini ottenute con IR-ITR sulle pitture murali altomedioevali di interesse della basilica paleocristiana di San Clemente non è possibile osservare la presenza di dettagli nascosti o di ripensamenti dell'artista al di sotto dello strato pittorico superficiale. Questo può essere dovuto all'effettiva assenza di tali dettagli/ripensamenti oppure alla presenza di strati pittorici troppo spessi o troppo assorbenti/riflettenti o di una sovrapposizione di intonaci di spessore tale da impedire la penetrazione della radiazione IR al di sotto dello strato superficiale e, quindi, la rivelazione di eventuali dettagli nascosti.

Dai risultati ottenuti si può comunque concludere che le analisi IR-ITR permettono di migliorare la leggibilità di alcune aree del ciclo pittorico altomedioevale che si trovano in un cattivo stato di conservazione favorendone così il loro parziale recupero, almeno dal punto di vista digitale. Queste indagini possono essere affiancate da un opportuno post-processing delle immagini originali (ovvero dei raw data) con tecniche come l'aumento del contrasto, la regolazione della luminosità e un opportuno filtraggio, al fine di migliorare ulteriormente i risultati ottenuti e, in particolare, la leggibilità delle aree indagate.

Le immagini così ottenute consentono di rendere le opere meglio fruibili sia al pubblico interessato e sia agli esperti del settore, di poter effettuare uno studio diagnostico oggettivo, di fornire la corretta interpretazione ed attribuzione storico-artistica a quelle pitture degradate che presentano problemi da questo punto di vista ed, eventualmente, un monitoraggio nel tempo dello stato di conservazione (analisi differenziale).

Un ulteriore studio più approfondito delle immagini IR-ITR per la ricerca dell'eventuale presenza di dettagli nascosti, nel caso specifico affiancato con altre tecniche di imaging, potrebbe essere utile per migliorare il livello di conoscenza delle pitture murali altomedioevali e può essere considerato, a tutti gli effetti, come work in progress.

7. BIBLIOGRAFIA

-
- [1] S. Paone, *Arte e Tecnologia*, Ledizioni, Milano 2018.
 - [2] G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio, "State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation", *Sensors (Basel)*, 9, 1 2009, 568-601.
 - [3] W. Benjamin, *L'opera d'arte nell'epoca della sua riproducibilità tecnica*, Giulio Schiavoni (a cura di), BUR Rizzoli, Segrate (Milano), 2013.
 - [4] S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Francucci, M. Ciaffi, A. Danielis, "Laser Scanners for High-Quality 3D and IR Imaging in Cultural Heritage Monitoring and Documentation", *Journal of Imaging*, 4, 130, 2018, 1 - 18.

-
- [5] F. Guidobaldi, *San Clemente: gli edifici romani, la basilica paleocristiana e le fasi altomedievali*, Collegio San Clemente, Roma, 1992.
- [6] S. Romano, *Le pareti e i pilastri con storie di San Clemente e sant'Alessio nella chiesa inferiore di San Clemente*, in *Riforma e Tradizione*, a cura di S. Romano, Jaca Book, Milano, 2006, (La pittura medievale a Roma 312-1431: corpus e atlante, a cura di M. Andaloro, S. Romano. Corpus, IV), 129-150.
- [7] J. Mullooly O.P., *Sain Clement pope and martyr and his basilica in Rome*, Benedict Guerra, Roma, 1869.
- [8] G. B. De Rossi, *Prime origini della basilica di S. Clemente*, *Bullettino di Archeologia cristiana*, 1, 1863, 25-31; Appendice all'articolo sulle prime origini della basilica di S. Clemente, *ibidem*, p. 39, 89-90.
- [9] J. Wilpert, *Die römischen Mosaiken und Malereien der kirchlichen Bauten vom IV bis XIII Jahrhundert*, Herdersche Verlagshandlung, Freiburg im Breisgau, 1917.
- [10] L. Nolan O.P., *The basilica of S. Clemente in Roma*, Tipografia Cuggiani, Roma, 1910.
- [11] C. Cecchelli, *S. Clemente (Le chiese di Roma illustrate, nn. 24-25)*, Danesi Editore, Roma, 1930.
- [12] G. Matthiae, *Pittura romana del Medioevo*, 2^a ed. con aggiornamento scientifico e bibliografia di M. Andaloro (Tomo I: secc. IV-X), Fratelli Palombo, Roma, 1987.
- [13] Eileen Kane, *The painted decoration of the church of San Clemente. The earliest centuries*, in *Art and Archaeology (San Clemente Miscellany, vol. II)*, apud S. Clementem, Romae, 1978, 60-80.
- [14] J. Osborne, *Early medieval wall-paintings in the lower church of San Clemente, Rome* (Ph. D. Dissertation, Courtauld Institute, London 1979), Garland, New York, 1984.
- [15] G. Bordini, *San Clemente*, in *Atlante. Percorsi visivi*, a cura di M. Andaloro, Jaca Book, Milano, 2006 (La pittura medievale a Roma 312-1431: corpus e atlante, a cura di M. Andaloro, S. Romano. Atlante, I), 167-190.
- [16] C. Cianfriglia, *A new analysis of the north wall of San Clemente lower church and its frescoes. A early Final Judgement?*, Tesi di Laurea Magistrale in "Art history in Rome: from Late Antiquity to the present", Università degli Studi di Roma Tor Vergata, Facoltà di Lettere e Filosofia, anno accademico 2020-2021 (tesi non pubblicata).
- [17] C. Zanotti, *Introduzione alla fotogrammetria*, New Magazine, Synthesis, Trento, 1991.
- [18] T. Schenk, *Digital Photogrammetry*, TerraScience, Laurelville, Ohio (USA), 1999.
- [19] G. Bitelli, A. Capra, A. Zanutta, *Photogrammetric surveying of "Nymphaea" in Pompeii*, CIPA, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV, 5/C7, 2002, 236-242.
- [20] P. J. Besl, *Active, optical range imaging sensors*, *Machine Vision and Applications*, 1, 2, 1988, 127-152.
- [21] F. Blais, J. A. Beraldin, *Recent developments in 3D multi-modal laser imaging applied to cultural heritage*, *Machine Vision and Applications* 17, 6, 2006, 395-409.
- [22] W. Meschieri, *Rilievo 3D con i laser scanner*, Zanichelli, 217, Bologna 2019.

-
- [23] D. Nitzan, A. E. Brain, R. O. Duda, The measurement and use of registered reflectance and range data in scene analysis, *Proceedings of the IEEE*, 65, 2, 1977, 206-220.
- [24] S. Poujoul, B. Journet, A twofold modulation frequency laser range finder, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 4, 6, 2002, S356-S363.
- [25] M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, R. Ricci, Remote colorimetric and structural diagnosis by RGB-ITR color laser scanner prototype, *Advances in Optical Technologies*, 2012, 1-6.
- [26] M. Guarneri, A. Danielis, M. Francucci, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, A. Mencattini, 3D remote colorimetry and watershed segmentation techniques for fresco and artwork decay monitoring and preservation, *Journal of Archaeological Science*, 46, 1, 2014, 182-190.
- [27] S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Romani, L. Giacomini, M. Francucci, M. Ciaffi, M. Ferri De Collibus, A. Puiu, G. Verona-Rinati, F. Colao, R. Fantoni, Are the blue daemons really blue? Multidisciplinary study for the colours characterization of the mural paintings inside the Blue Daemons Etruscan tomb, *Journal of Cultural Heritage* 47, 2021, 257 - 264.
- [28] S. Ceccarelli, M. Francucci, M. Ferri De Collibus, M. Ciaffi, R. Fantoni, R. Carmagnola, G. Adinolfi, M. Guarneri, Comparative study of historical and scientific documentation of the paintings in the Querciola Tomb in Tarquinia, *Journal of Cultural Heritage* 61, 2023, 229-237.
- [29] M. Guarneri, S. Ceccarelli, M. Francucci, M. Ciaffi, M. Ferri De Collibus, Multispectral Remote Digitalisation of Large-Scaled Paintings in Palazzo Chigi of Ariccia, *Advanced Technologies for Cultural Heritage Monitoring and Conservation. The Collection of Chigi Palace in Ariccia, Italy, Digital Innovations in Architecture, Engineering and Construction*, section Paintings, 17 - 28, Sofia Ceccarelli, Mauro Missori, Roberta Fantoni Editors, Springer 2024.
- [30] S. Ceccarelli, M. Guarneri, N. Orazi, M. Francucci, M. Ciaffi, F. Mercuri, M. Ferri de Collibus, Ugo Zammit, Francesco Petrucci, Remote and contactless infrared imaging techniques for stratigraphical investigations in painting on canvas, *Applied Physics B* 127, Number 106, 2021, 13 pagine.
- [31] M. Francucci, M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Ciaffi, M. Nuvoli, M. Pistilli, RGB-ITR and IR-ITR: two laser scanner prototypes for fruition, study, monitoring and diagnostics of Cultural Heritage, *Proceedings of the Workshop "Ricerca, sviluppo e applicazioni per i Beni Culturali. Dai risultati del progetto VADUS alle future collaborazioni"*, centro ricerche ENEA di Frascati (Roma), 9 - 10 maggio 2023.

8. RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare vivamente Padre Paul Lawlor e l'architetto Romano Cerro, rispettivamente priore e responsabile tecnico della Basilica di San Clemente in Roma, per aver acconsentito all'esecuzione delle misure con laser scanner IR-ITR e per il supporto dato durante le stesse. Si desidera altresì ringraziare Padre Lawlor e l'architetto Cerro per la disponibilità e l'interesse mostrati all'attività di indagine svolta.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
ottobre 2024