

RA

restauro archeologico

Conoscenza, conservazione e valorizzazione
del patrimonio architettonico
Rivista del Dipartimento di Architettura
dell'Università degli Studi di Firenze

Knowledge, preservation and enhancement
of architectural heritage
Journal of the Department of Architecture
University of Florence

1 | 2025

FIRENZE
UNIVERSITY
PRESS

RA

restauro archeologico

Conoscenza, conservazione e valorizzazione
del patrimonio architettonico
**Rivista del Dipartimento di Architettura
dell'Università degli Studi di Firenze**

Knowledge, preservation and enhancement
of architectural heritage
**Journal of the Department of Architecture
University of Florence**



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE | Dipartimento
di Architettura

RA | restauro archeologico

Conoscenza, conservazione e valorizzazione
del patrimonio architettonico

**Rivista del Dipartimento di Architettura
dell'Università degli Studi di Firenze**

Knowledge, preservation and enhancement
of architectural heritage

**Journal of the Department of Architecture
University of Florence**

Anno XXXIII n. 1/2025
Registrazione Tribunale di Firenze
n. 5313 del 15.12.2003

ISSN 1724-9686 (print)
ISSN 2465-2377 (online)

EDITOR IN CHIEF

Susanna Caccia Gherardini,
Maurizio De Vita
(Università degli Studi di Firenze)

DIRECTOR

Susanna Caccia Gherardini
(Università degli Studi di Firenze)

INTERNATIONAL SCIENTIFIC BOARD

Hélène Dessales
Benjamin Mouton
Carlo Olmo
Zhang Peng
Andrea Pessina
Guido Vannini

EDITORIAL BOARD

Andrea Arrighetti
Sara Di Resta
Junmei Du
Annamaria Ducci
Maria Grazia Ercolino
Rita Fabbri
Gioia Marino
Pietro Matracchi
Emanuele Morezzi
Federica Ottoni
Andrea Pane
Rosario Scaduto
Raffaella Simonelli
Andrea Ugolini
Maria Vitiello

EDITORIAL STAFF

Francesca Benedetta Giusti
Virginia Neri
Francesco Pisani
Margherita Vicario

*Il presente volume è il risultato del dialogo tra studiosi e ricercatori svoltosi il
28 febbraio 2025 presso l'Opificio delle Pietre Dure di Firenze.
Si ringrazia la Soprintendente Emanuela Daffra e tutto il personale dell'OPD per
l'occasione di confronto e la cortese ospitalità.*

Cover photo

Montecatini Terme, Kursaal, dettaglio del salone principale.
(foto A.L. Petracci, A. Rossano)

Copyright: © The Author(s) 2025

This is an open access journal distributed under the Creative Commons
Attribution-ShareAlike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>)

Gli autori sono a disposizione di quanti, non rintracciati, avessero legalmente diritto alla
corresponsione di eventuali diritti di pubblicazione, facendo salvo il carattere unicamente
scientifico di questo studio e la sua destinazione non a fine di lucro.

published by

Firenze University Press
Università degli Studi di Firenze
Firenze University Press
Borgo Albizi, 28, 50122 Firenze, Italy
www.fupress.com

graphic design

didacommunicationlab
DIDA Dipartimento di Architettura
Università degli Studi di Firenze
via della Mattonaia, 14
50121 Firenze, Italy

Alice Trematerra
Violante Salvatici

Stampato su carta di pura cellulosa *Fedrigoni*



Indice

Anatomia di un restauro. Il ruolo della diagnostica non distruttiva per la conservazione del patrimonio <i>S. Caccia Gherardini</i>	4
Indagini GPR per la definizione della struttura di impalcati nella sede dell'Opificio delle Pietre Dure in via degli Alfani a Firenze <i>M. Coli</i>	14
Applicazioni del GPR per l'analisi degli intonaci di supporto a pitture murali: il caso studio della cappella Bardi a Firenze <i>E. Marchetti</i>	22
Indagini non distruttive con neutroni: alcuni casi di studio, da minuscole filigrane dorate a catene di ferro giganti <i>D. Di Martino</i>	30
Il bene e il suo contesto: il monitoraggio termografico e ambientale, metodo integrato per orientare strategie di conservazione e verificarne l'efficacia <i>M. Volinia, M. Girotto</i>	36
Tra passato e futuro: studi e ricerche mediante diagnostica non invasiva sulla collezione del Museo Archeologico Nazionale di Firenze <i>G. Basilissi, D. F. Maras</i>	48
Disseminazione nel contesto internazionale delle prove non distruttive nel settore dell'ingegneria civile e dei beni culturali: la collaborazione tra AIPnD e IAEA <i>D. Foppoli</i>	62

Anatomia di un restauro. Il ruolo della diagnostica non distruttiva per la conservazione del patrimonio

Susanna Caccia Gherardini

susanna.cacciagherardini@unifi.it

Dipartimento di Architettura (DiDA),
Università degli Studi di Firenze

pagina a fronte

Fig. 1

Montecatini Terme, Kursaal,
dettaglio del salone principale
(foto A.L. Petracchi, A. Rossano).

Abstract

Even today, theoretical inquiry remains central to restoration practice. It is only through a solid critical awareness that one can effectively approach both diagnostic processes and the interpretation of their outcomes.

The text calls for a thoughtful reassessment of the role that theory and humanistic culture ought to play in the field of restoration – particularly in our time, when the appeal of technological advancement and the proliferation of diagnostic tools risk overshadowing these foundational dimensions.

The preservation of cultural heritage rests, first and foremost, on the ability to discern its intrinsic values and to make informed decisions about their transmission to future generations – prior to, and in support of, identifying the technical solutions that must ultimately shape any restoration project.

Key-words

Heritage, Restoration, Theory, Monitoring, Diagnostic.

La letteratura si occupa oggi di quasi ogni aspetto del restauro, trasferendo in questa disciplina conoscenze e competenze di molti altri settori, spesso non riuscendo a superare le barriere linguistiche o la questione dei bagagli culturali che ciascuno si porta dietro. Per provare a ripartire in un contesto di studi così affollato, il riconoscimento che il restauro sia una produzione sociale, che ha con i valori un rapporto dialogico non normativo e che la sua scientificità si fonda su una contraddizione, potrebbe essere un primo passo.

L'eccessiva specializzazione della disciplina cui oggi si assiste porta infatti alla moltiplicazione di strumenti e tecniche e a un 'territorio del restauro' che si è ampliato sino a comprendere quasi ogni oggetto materiale e immateriale, portando a una dilatazione ipertrofica del contenitore patrimoniale.

Da qui si è finiti con il perdere una delle caratteristiche che segnavano la specificità del restauro: la scelta di cosa conservare o restaurare.



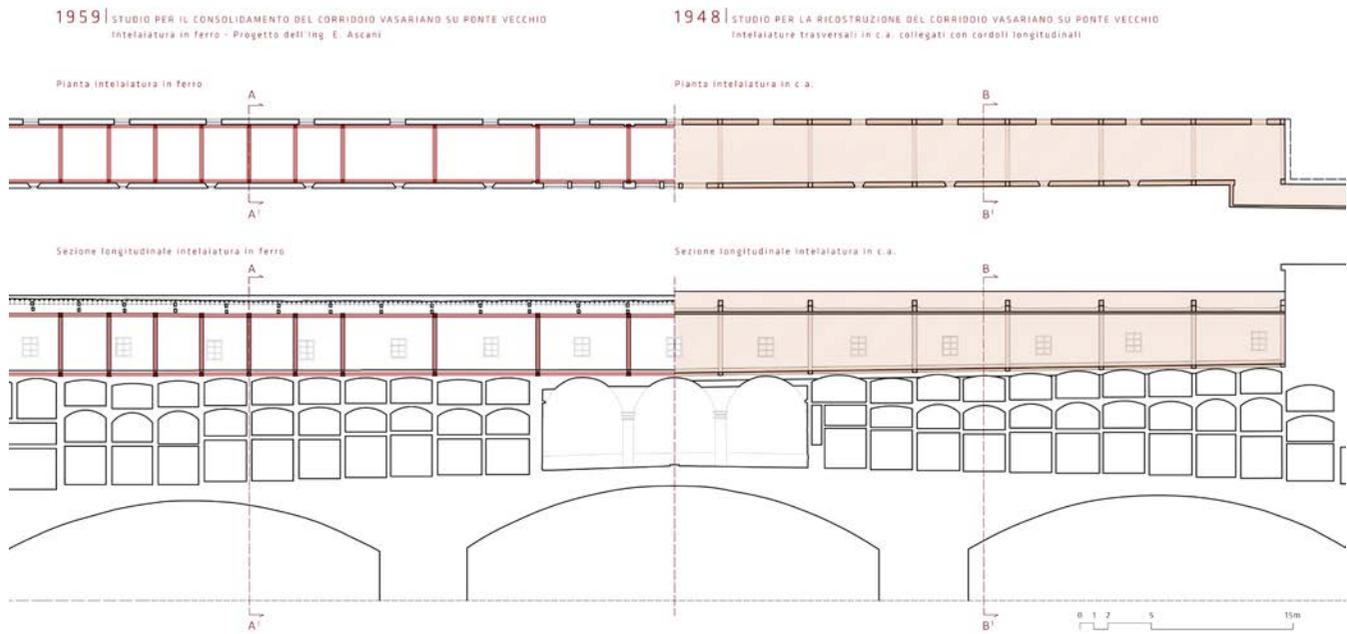


Fig. 2
Firenze, il Corridoio Vasariano e
Ponte Vecchio (elaborazione F.
Massi, C. Monci).

La responsabilità rispetto a una memoria collettiva, che rimane il vero committente di ogni restauro, potrebbe allora riaprire la difficile strada di una riflessione teorica, che oggi appare quanto mai opportuno usare anche come antidoto ad una dilagante deriva tecnocratica¹. La questione che si pone diventa allora domandarci quali siano le ragioni che stanno alla base di un'azione di restauro e ciò che l'azione del restauro può trasmettere di diverso dalla testimonianza, che dovrebbe essere la ragion stessa del suo esistere. Se così fosse, il nodo epistemico e culturale da affrontare diventa la riflessione teorica su cosa (e a chi) 'trasmette' un restauro².

Trasmettere implica due condizioni connotative dell'azione di restauro che vanno per lo meno ridiscusse. Si restaura perché ovviamente esiste un bisogno di trasmissione tra uno stato dell'opera prima e dopo l'intervento, ma passando attraverso una selezione. Ma come avviene questa selezione? Quali sono gli strumenti, che possono guidare, motivare, attribuire significato a questa selezione?

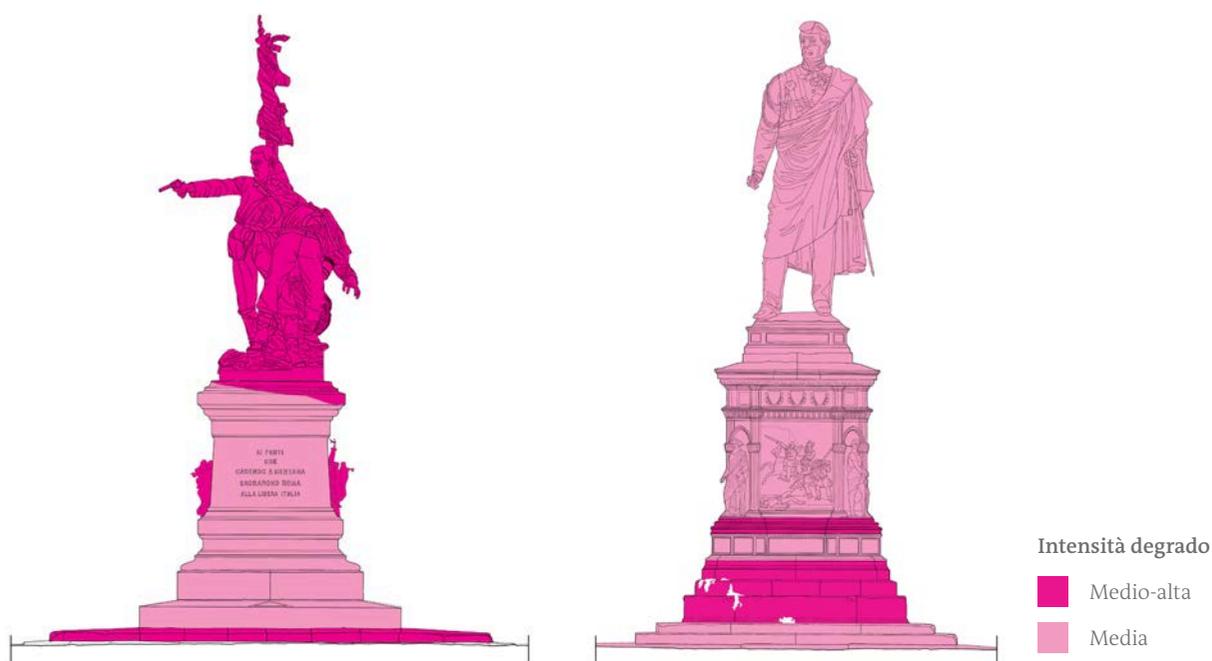
Chi interviene giudica alcuni valori non negoziabili rispetto allo statuto dell'opera, mentre altri valori lo sarebbero. In realtà 'il trasmettere' riapre totalmente il rapporto dell'azione di restauro con le fonti e in particolare con la critica delle fonti³. Ad entrare in azione è soprattutto il ruolo dell'instabilità dei valori che si dovrebbero trasmettere, per cui il ricorso a protocolli sembra la medicina in grado di garantire insieme l'autorità di chi interviene e l'ordinarietà dell'atto che si compie.

Le posizioni teoriche spesso si fondano sull'esperienza come forma fondativa della conoscenza e si articolano nella pratica del progetto e ancor più nella fenomenologia del cantiere di restauro. Un difficile rapporto che aiuta a spiegare la fortuna in questi ultimi anni della letteratura sugli elementi cardine della conoscenza, della diagnostica e del progetto, elementi sempre ricondotti alla specificità, quando non all'unicità, dei singoli casi. Questo raffronto vede da un lato l'incremento degli strumenti diagnostici

¹ CACCIA GHERARDINI S. 2025, *L'eccezione come regola: il paradosso teorico del restauro/The Exception as the Rule: The Paradox of Restoration*, Firenze University Press, Firenze.

² OLMO C. 2023, *Storia e controstorie*, Donzelli, Roma.

³ CHABIN M-A. 2004, *Document trace et document source. La technologie numérique change-t-elle la notion de document?*, «Revue I3-Information Interaction Intelligence», vol. 4 (1), pp. 141-157; PONCET O., ANHEIM J. 2004, *Fabriques des archives, fabrique de l'histoire*, «Revue de synthèse», n. 125, numero speciale.



e delle tecnologie avanzate, sempre più incentrate sulla ricerca di soluzioni compatibili anche con una sostenibilità, che nel restauro dovrebbe avere una sua specificità, o sulla promozione di un'immagine spendibile sul mercato⁴.

Nessuna formulazione meglio rappresenta la difficoltà del trasmettere in una cultura, quella del restauro, che ha perso la certezza dei valori e la convinzione che sia l'identità l'obiettivo cui il restauratore deve mirare. Un'identità, seppur esiste, rispetto però a cosa e a quali ipotetici fruitori la si può tirare in ballo? E di sicuro la questione dell'identità si porta dietro quella assai più complessa della patrimonializzazione.

E infatti forse nessuna attività umana ha come proprio oggetto i paradossi che la patrimonializzazione porta con sé, come il restauro⁵. Una traccia materiale subisce una metamorfosi e diventa monumento, quando una politica, in Europa almeno, la investe del problema dell'identità (locale, nazionale quando non universale). In ballo ritorna così cosa il restauro oggi dovrebbe definire sia 'il fatto' di cui si occupa.

L'opera architettonica per un lungo periodo di tempo è diventata documento di se stessa, quasi una riedizione speculare del fenomeno immateriale che trasmette, dei valori cioè che dovrebbe incarnare. Non solo, è diventata il documento che ordina le altre fonti e gli altri archivi – l'opera architettonica è il primo archivio che struttura i materiali esterni (carte, disegni, ricezione nelle sue diverse forme) –, ma anche che mette in discussione cosa sia prova e quindi lo stesso ruolo della diagnostica. Il caso della Villa Savoye di Le Corbusier ci racconta di come l'autorità, non solo l'autorialità, si eserciti in primo luogo attraverso la (mancata) critica delle fonti. In questo caso storia, restauro, diagnostica si scambiano ruoli e funzioni nel tempo. In senso più ampio il restauro delle opere di Le Corbusier è l'occasione anche di riportare al centro della riflessione critica e teorica temi nodali della riflessione sul restauro dell'architettura. Restauri come quello della villa Savoye hanno riaperto un confronto sul tema della temporalità di un'architettura

Fig. 3
 Firenze, Monumento ai Caduti di Mentana (sinistra), Monumento a Manfredo Fanti (destra), analisi dei degradi (elaborazione P. Bordoni, A.L. Petracchi).

⁴ Sul termine 'sostenibilità' si vedano gli studi di Marco Biffi, in particolare BIFFI M., DELL'ANNA V., GUALDO R. 2023, *L'italiano e la sostenibilità*, goWare, Firenze. Sul più scivoloso concetto di 'restauro sostenibile' cfr. BORDONI P., *Sustainable Heritage: il valore della sostenibilità per la conservazione e la gestione del patrimonio culturale*, tesi di dottorato, Architettura Progetto Conoscenza e Salvaguardia del Patrimonio Culturale, Ciclo XXXVII, Università degli Studi di Firenze (supervisore Caccia Gherardini S.).

⁵ CACCIA GHERARDINI S. 2024, *Contemporary paradoxes of heritage. An international perspective on restoration*, «Restauro Archeologico», vol. 32 (1), pp. 4-19.



autorale, come dell'autenticità, riaprendo una discussione sulla possibilità di tradurre il valore dell'autenticità in regole e pratiche di cantiere. Un intreccio davvero complesso che arriverà a discutere del ruolo delle fonti come della diagnostica e della loro gerarchia nel progetto di restauro⁶.

Ma non solo. In questo contesto anche la fotografia apre un'altra questione nodale per il restauro, e in questo caso specifico del patrimonio del moderno, quello dell'utilizzo delle immagini come fonte per l'intervento di restauro. In questo caso possiamo parlare di presa di 'posizione delle immagini', per riprendere il titolo di un libro di Georges Didi-Hubermann⁷, per comprendere il ruolo che la fotografia ha avuto e ha nel restauro dell'architettura autorale, e non solo certamente delle architetture lecorbuseriane. Questione certo di non poco peso nelle scelte dei cantieri di restauro, perché sarà lo stesso Le Corbusier attraverso la fotografia a imporre l'immagine della villa Savoye, indipendentemente da qualsiasi verifica sul piano storico o diagnostico e questo proseguirà per tutti i cantieri. Difficile in questo senso il rapporto con le indagini diagnostiche (dalle stratigrafie delle pellicole pittoriche alla caratterizzazione chimico fisica dei campioni di malte prelevate), che nonostante confermassero ciò che un'attenta ricerca storica aveva messo a fuoco, hanno finito per lasciare spazio alla 'precauzione estetica' piuttosto che a quella patrimoniale, influenzando anche altre scelte di restauro sul patrimonio lecorbuseriano alle diverse geografie⁸.

⁶ La storia della villa Savoye di Le Corbusier è stata raccontata da decine di volumi, saggi, mostre e articoli. E tra questa letteratura rientrano le ricerche che da quasi dieci anni a questa parte chi scrive porta avanti con Carlo Olmo, cfr. CACCIA S., OLMO C. 2016, *La villa Savoye. Icona rovina restauro 1948-1968*, Donzelli, Roma; CACCIA GHERARDINI S. 2023, *Le Corbusier e la villa Savoye: un caso di restauro autorale / Le Corbusier and the villa Savoye: a case of authorial restoration*, Firenze University Press, Firenze.

⁷ DIDI-HUBERMAN G. 2009, *Quand les images prennent position. L'Œil de l'Histoire*, Les Editions de Minuit, Paris.

⁸ CACCIA S. 2014, *Le Corbusier dopo Le Corbusier. Retoriche e pratiche nel restauro dell'opera architettonica*, Franco Angeli, Milano.



pagina a fronte

Fig. 4
Firenze, Opificio delle Pietre Dure, via degli Alfani, fotopiano ed *elevation map* del prospetto principale (elaborazione A. Rossano).

in questa pagina

Fig. 5
Firenze, Palazzo Vecchio, dettagli della struttura lignea a supporto della copertura del Salone dei Cinquecento (Archivio Corrente – Ufficio Belle Arti, n.n.).



Fig. 6
 Firenze, Mura della città - tratto Belvedere, campioni del paramento analizzati al microscopio digitale (DVM6) con diversi fattori di ingrandimento (acquisizioni P. Lagani).

Spesso chi opera nel campo del restauro architettonico si trova di fronte a due estremi a seconda non solo dell'area geografica in cui ci si trova ad operare, ma anche a quale 'scuola' il restauratore fa riferimento. Gli opposti estremismi potremmo provocatoriamente dire sono rappresentati dal *retour à l'origine*, molto praticato in area francese, dove le teorie di Viollet Le Duc sembrano non essere del tutto abbandonate, e la conservazione di ogni traccia che l'edificio presenta (un atteggiamento di conservazione estrema, molto frequente in Italia e in ogni paese dove operi la Scuola italiana).

Questo secondo atteggiamento, quello della conservazione a oltranza, persegue con attenzione ossessiva l'idea dell'autenticità materica, che spesso appare difficilmente perseguibile⁹. Un'autenticità che è in primo luogo fisica e per questo i saperi esperti del restauro come la diagnostica sono chiamati in causa in prima battuta. Un parametro quindi quello dell'autenticità, caposaldo della cultura italiana del restauro a partire dagli anni Sessanta del Novecento, che vede il suo padre fondatore nello storico dell'arte Cesare Brandi, oggi può essere ancora perseguibile? E nel caso come conciliarlo con quello della sostenibilità?

Per quanto spesso sia un parametro nel restauro architettonico, pur con la più attenta campagna diagnostica, difficilmente perseguibile solo guardando alle ragioni tecniche o economiche, ma anche perché talvolta i materiali originari possono nascere già 'difettati'. Questione evidente ad esempio nel caso dei laterizi con cui è stata realizzata la scuola di teatro del gruppo delle Scuole d'Arte dell'Havana a Cuba, oggetto di un progetto di cooperazione internazionale guidato dal Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze. Alla fine di un'attenta campagna diagnostica, molte e ripetute analisi e prove per il consolidamento degli elementi, composti da argilla non omogenea caratterizzata dalla presenza di numerose calcificazioni, si è finiti con l'ipotizzare tra le diverse soluzioni la loro sostituzione¹⁰.

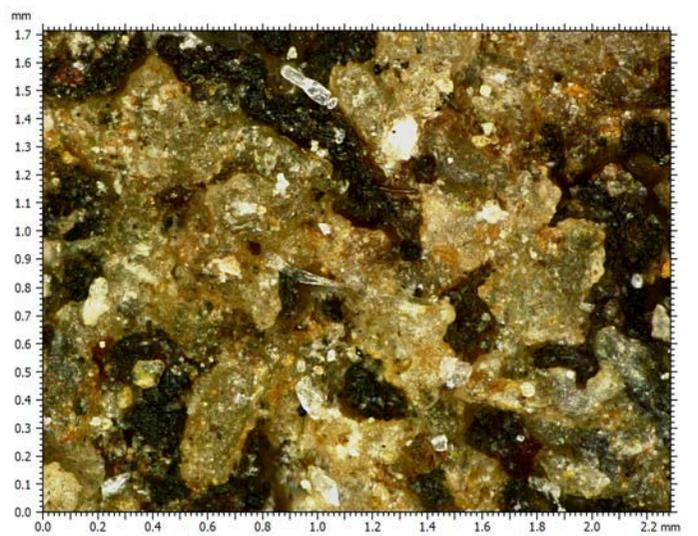
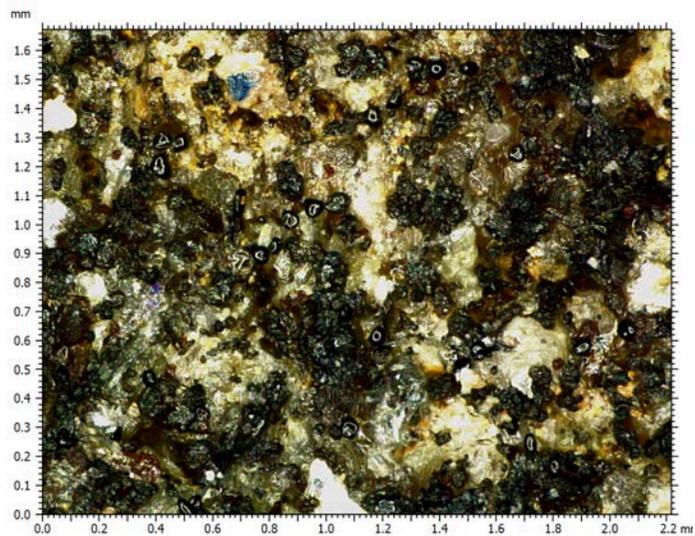
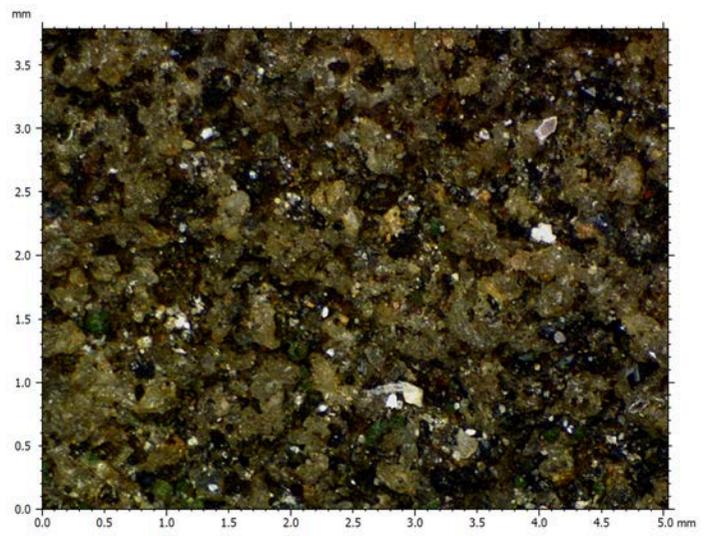
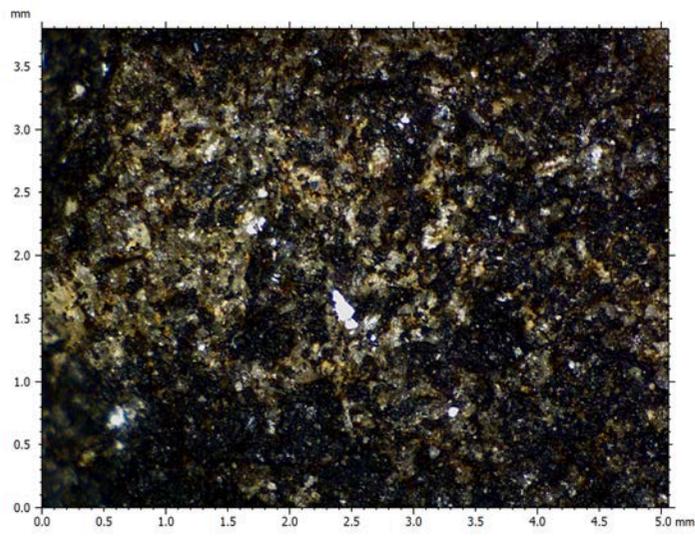
Del resto da tempo vi è un punto di partenza condiviso per chi si occupa di restauro: l'individualità di ciascun intervento, da studiare e valutare partendo dal processo conoscitivo dell'opera e del suo contesto (individualità del fatto). Un'individualità che si fonda peraltro su un processo progettuale segnato da una continuità, che va a sua volta problematizzata e riconcettualizzata. Se i limiti cognitivi, prima che operativi del restauro devono essere individuati di volta in volta – in relazione alle variabili connesse al carattere proprio di ogni organismo architettonico – è la nozione di 'continuità' insita nell'azione progettuale del restauro che va ridefinita. Una continuità che dovrebbe interessare tutto l'iter conoscitivo e operativo, dall'iniziale processo di conoscenza condotto attraverso opportune indagini diagnostiche al monitoraggio (anch'esso strumento di conoscenza) conseguente alla fase di intervento vera e propria, ma spesso utilizzato per la conservazione preventiva¹¹.

Un processo dal quale emergono come passaggi conoscitivi la storia, le stratificazioni di simbologie, i restauri pregressi, l'analisi dei cambiamenti delle funzioni, delle tecniche e dei materiali, e che di conseguenza richiederà l'apporto di più discipline per la pluralità delle conoscenze che entrano in gioco. L'insistente richiamo al rigore di analisi preliminari, della diagnostica e di studi sulla materialità della fabbrica, anche in relazione alla 'prova del tempo' e ai risultati, talvolta disastrosi, derivati dall'impiego di materiali e tecniche innovative non sempre adeguatamente verificate, non vuole essere solo un richiamo fine a se stesso. In questo senso la 'prova' (e con questo termine possiamo in parte abbracciare anche quelle diagnostiche), fondamento di ogni ricerca scientifica, assume nel linguaggio del ricercatore/restauratore un significato proprio e specifico, sottolineando anche la necessità di una conoscenza stratificata della fabbrica.

⁹ MARINO B. G. 2006, *Restauro e Autenticità. Nodi e questioni critiche*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli.

¹⁰ CACCIA GHERARDINI S., PARADISO M. 2023, *Proyecto de Restauración, Conservación y Consolidación / Progetto di Restauro, Conservazione e Consolidamento*, in MERLO A., FELICIANO VALENCIAGA Y. (eds.), *¡Que no baje el telón! Proyecto de restauración y rehabilitación de la Facultad de Arte Teatral del ISA/ Progetto di restauro e riabilitazione della Facultad de Arte Teatral dell'ISA*, Dida Press/Cupulas, Firenze-La Habana, pp. 183-246.

¹¹ Tra i molti lavori, cfr. DELLA TORRE S., ROSINA E. 2008, *Rapid techniques for monitoring historic fabric in preservation plan*, in TIANO P., PARDINI C. (a cura di), *In situ monitoring of monumental surface*, Edifir Edizioni, Firenze, pp. 421-425; DELLA TORRE S. 2010, *Preventiva, integrata, programmata: le logiche coevolutive della conservazione*, in BISCONTIN G., DRIUSSI G. (a cura di), *Pensare la prevenzione. Manufatti, usi, ambienti*, atti del XXVI convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 13-16 luglio 2010, Arcadia Ricerche, Venezia, pp. 67-76; SARAH S. 2013, *Historical Perspectives on Preventive Conservation*, Getty Conservation Institute, Los Angeles; VANDESANDE A., VAN BALEN K. 2018, *Preventive conservation applied to built heritage: a working definition and influencing factors*, in VAN BALEN K., VANDESANDE A. (eds.), *Reflections on Cultural Heritage Theories and Practices, Innovative Built Heritage Models*, vol. 3, CRC Press, Balkema, pp. 63-72; DELLA TORRE S. 2022, *Conservazione programmata: la visione, le politiche, le pratiche*, «Il capitale culturale», n. 12, pp. 94-104.



Il restauro si presenta come un atto di conoscenza continua, continuata e continuativa, come già detto, che si concretizza nel restituire con precisione filologica l'esecuzione dei lavori, nel raccogliere in modo critico i dati necessari a predisporre una documentazione completa e utilizzabile in fase di controllo degli interventi via via effettuati, anche nel caso in cui l'oggetto sia semplicemente un gruppo scultoreo o una più stratificata struttura lignea a supporto della copertura del Salone dei Cinquecento di Palazzo Vecchio a Firenze.

L'eccezionale e complessa copertura del Salone, realizzata sul finire del Quattrocento da Simone del Pollaiuolo poi trasformata da Giorgio Vasari per arrivare alla sua configurazione con gli interventi ottocenteschi finalizzati al rafforzamento dell'impalcato ligneo e del relativo sistema di capriate, sarà soggetta a una serie di attività di monitoraggio per la definizione di linee guida per il restauro e di criteri di conservazione programmata¹².

E questa impostazione teorico-metodologica ha interessato anche la serie di studi e ricerche relativi ai lavori di restauro del corridoio di Giorgio Vasari agli Uffizi. Il restauro del Corridoio evidenzia la centralità dell'indagine conoscitiva per la definizione del progetto. In questo caso specifico le conoscenze acquisite dai documenti cartacei si misurano con le scelte progettuali e la pratica di cantiere, rivelando come l'indagine diagnostica, la ricerca storica e il riconoscimento dei valori rappresentino i punti fondamentali per il restauro. E nel caso del 'corridoio', la complessità della ricerca ha portato all'acquisizione di informazioni che possono innescare un confronto continuo con la storia e le sue temporalità, spesso interpretabili in modo conflittuale. Anche in questo caso, il processo di conoscenza non sembra configurarsi come un atto neutro e, va ricordato, non può prescindere dal riconoscimento dei valori, delle convinzioni e dei pregiudizi da cui muove il ricercatore stesso¹³.

Oggi appare opportuno mettere a fuoco alcune considerazioni attorno a uno dei nodi più complessi per il restauro, ma non solo, quello della natura delle fonti e delle 'prove'. Se è vero che la critica delle fonti non rende 'scientifica' l'indagine, questa però appare pre-condizione, oggi più che mai, perché il processo conoscitivo e decisionale del restauratore muova dal delicatissimo rapporto, spesso conflittuale, tra coscienza di ciò che queste consentono di sapere e la conoscenza della loro origine e il loro uso nel tempo. Il problema di come strutturare un'indagine che abbia la finalità di far emergere con chiarezza la fisionomia, la natura, la materialità, i caratteri propri dell'edificio, non senza dichiarare le eventuali lacune e cambiamenti emersi nel percorso conoscitivo, è tutt'altro che banale e, ad oggi, rappresenta un problema in gran parte sottovalutato. Non esiste nel restauro una teoria dell'oblio, di ciò che è stato dimenticato oppure di ciò che non esiste più, perché e soprattutto se è giusto che tale rimanga. Forse nel nostro caso oggi non guasterebbe, per non scivolare in una pericolosa deriva del restauro, fare un piccolo richiamo a quella che Jiri Benovsky chiamerebbe *the virtues of non-existence*¹⁴.

¹² Si veda a questo proposito l'impostazione delle ricerche e degli studi effettuati dall'unità di ricerca coordinata da chi scrive per i gruppi statuari di epoca risorgimentale della città di Firenze, che quelli in corso sulla struttura lignea del Salone dei Cinquecento a Palazzo Vecchio, sulla base di una convenzione *Progetto di conoscenza per la valutazione e il monitoraggio dello stato di conservazione delle strutture lignee di Palazzo Vecchio, del complesso monumentale di Santo Spirito e dell'insieme della statuaria di epoca risorgimentale del Comune di Firenze per la definizione di linee guida per gli interventi di restauro e manutenzione programmata* stipulata tra il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze e il Comune di Firenze.

¹³ CACCIA GHERARDINI S. 2023, *Fragile da conservare. Percorsi di conoscenza per i restauri del Corridoio Vasariano agli Uffizi*, in DELLA TORRE S., RUSSO V. (coord.), *Restauro dell'architettura. Per un progetto di qualità*, Edizioni Quasar, Napoli.

¹⁴ BENOVSKY J. 2019, *Eliminativism, Objects and Persons. The virtues of Non-Existence*, Routledge, London.

Bibliografia

- BENOVSKY J. 2019, *Eliminativism, Objets and Persons. The virtues of Non-Existence*, Routledge, London.
- BIFFI M., DELL'ANNA V., GUALDO R. 2023, *L'italiano e la sostenibilità*, goWare, Firenze.
- BORDONI P., *Sustainable Heritage: il valore della sostenibilità per la conservazione e la gestione del patrimonio culturale*, tesi di dottorato, Architettura Progetto Conoscenza e Salvaguardia del Patrimonio Culturale, Ciclo XXXVII, Università degli Studi di Firenze (supervisore Caccia Gherardini S.).
- CACCIA GHERARDINI S. 2023, *Fragile da conservare. Percorsi di conoscenza per i restauri del Corridoio Vasariano agli Uffizi*, in DELLA TORRE S., RUSSO V. (coord.), *Restauro dell'architettura. Per un progetto di qualità*, Edizioni Quasar, Napoli.
- CACCIA GHERARDINI S. 2023, *Le Corbusier e la villa Savoye: un caso di restauro autoriale / Le Corbusier and the villa Savoye: a case of authorial restoration*, Firenze University Press, Firenze.
- CACCIA GHERARDINI S. 2024, *Contemporary paradoxes of heritage. An international perspective on restoration*, «Restauro Archeologico», vol. 32 (1), pp. 4-19.
- CACCIA GHERARDINI S. 2025, *L'eccezione come regola: il paradosso teorico del restauro/The Exception as the Rule: The Paradox of Restoration*, Firenze University Press, Firenze.
- CACCIA GHERARDINI S., PARADISO M. 2023, *Proyecto de Restauración, Conservación y Consolidación / Progetto di Restauro, Conservazione e Consolidamento*, in MERLO A., FELICIANO VALENCIAGA Y. (eds.), *¡Que no baje el telón! Proyecto de restauración y rehabilitación de la Facultad de Arte Teatral del ISA/ Progetto di restauro e riabilitazione della Facultad de Arte Teatral dell'ISA*, Dida Press/Cupulas, Firenze-La Habana, pp. 183-246.
- CACCIA S. 2014, *Le Corbusier dopo Le Corbusier. Retoriche e pratiche nel restauro dell'opera architettonica*, Franco Angeli, Milano.
- CACCIA S., OLMO C. 2016, *La villa Savoye. Icona rovina restauro 1948-1968*, Donzelli, Roma.
- CHABIN M-A. 2004, *Document trace et document source. La technologie numérique change-t-elle la notion de document?*, «Revue I3-Information Interaction Intelligence», vol. 4 (1), pp. 141-157.
- DELLA TORRE S. 2010, *Preventiva, integrata, programmata: le logiche coevolutive della conservazione*, in BISCONTIN G., DRIUSSI G. (a cura di), *Pensare la prevenzione. Manufatti, usi, ambienti*, atti del XXVI convegno internazionale Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 13-16 luglio 2010, Arcadia Ricerche, Venezia, pp. 67-76.
- DELLA TORRE S. 2022, *Conservazione programmata: la visione, le politiche, le pratiche*, «Il capitale culturale», n. 12, pp. 94-104.
- DELLA TORRE S., ROSINA E. 2008, *Rapid techniques for monitoring historic fabric in preservation plan*, in TIANO P., PARDINI C. (a cura di), *In situ monitoring of monumental surface*, Edifir Edizioni, Firenze, pp. 421-425.
- DIDI-HUBERMAN G. 2009, *Quand les images prennent position. L'Œil de l'Histoire*, Les Editions de Minuit, Paris.
- MARINO B. G. 2006, *Restauro e Autenticità. Nodi e questioni critiche*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli.
- OLMO C. 2023, *Storia e controsporie*, Donzelli, Roma.
- PONCET O., ANHEIM J. 2004, *Fabriques des archives, fabrique de l'histoire*, «Revue de synthèse», n. 125, numero speciale.
- SARAH S. 2013, *Historical Perspectives on Preventive Conservation*, Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- VANDESANDE A., VAN BALEN K. 2018, *Preventive conservation applied to built heritage: a working definition and influencing factors*, in VAN BALEN K., VANDESANDE A. (eds.), *Reflections on Cultural Heritage Theories and Practices, Innovative Built Heritage Models*, vol. 3, CRC Press, Balkema, pp. 63-72.

Indagini GPR per la definizione della struttura di impalcati nella sede dell'Opificio delle Pietre Dure in via degli Alfani a Firenze

Massimo Coli

massimo.coli@unifi.it

Dipartimento di Scienze della Terra (DST),
Università degli Studi di Firenze

pagina a fronte

Fig. 1

Firenze, Opificio delle
Pietre Dure, sede di via
degli Alfani.
Vista aerea della
corte interna (foto S.
Girardeau).

Abstract

As part of a general Framework Agreement for Collaboration between the Opificio and DST, pursuant to Article 15 of Law 241/1990, a program of studies and research was developed preparatory to the seismic assessment of the Opificio headquarters at Via degli Alfani 78 in Florence. Following the knowledge process defined by the 2011 MIBACT Guidelines, NDT surveys were conducted to define the structure and materials of the walls and floors. Specifically, for the latter, numerous georadar surveys were performed with various instruments, which led to the identification of the stratigraphy and typology of the existing floors. On this basis, a reference schedule was created, which was then used to map the floors of the various rooms for their seismic assessment.

Key-words

Georadar, Floor assessment, Diagnosis, Conservation, NDT.

Introduzione

La tematica della valutazione del patrimonio edilizio esistente pone numerose riflessioni in caso di approccio al percorso conoscitivo di edifici storici che spesso ospitano opere di pregio artistico o sono interessati da estesi apparati decorativi pittorici o plastici. Una valutazione attenta deve affrontare un percorso di indagine che consenta la definizione dell'attuale sistema strutturale resistente, delle modifiche subite finora e dei danni avuti nel corso della sua vita fino alla definizione delle tipologie murarie e la definizione delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali. L'attuale quadro normativo italiano¹ pone l'accento sulla definizione di un percorso della conoscenza basato sul rilievo geometrico e strutturale, la ricostruzione dell'evoluzione storica della fabbrica fino alla definizione delle caratteristiche meccaniche dei materiali.

In numerosi contributi la problematica del percorso della conoscenza è stata affrontata da diversi punti di vista ponendo l'accento su aspetti differenti in funzione del singolo caso; in particolare, le Linee Guida (DPCM 9/2/2011) prevedono indagini di tipo distruttivo e non distruttivo o debolmente distruttivo, pertanto l'approccio allo studio degli

¹ D.Lgs. 42/2004 - Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137. Gazzetta Ufficiale n.45 del 24-2-2004 - Supplemento Ordinario n. 28. DPCM 9/2/2011 - Decreto Presidenza Consiglio Ministri "Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni". Gazzetta Ufficiale GU Serie Generale n.47 del 26/02/2011 Zecca, Supplemento Ordinario n. 54. NTC 2018. Decreto del Ministro delle Infrastrutture 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni», Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 42 del 20 febbraio 2018, Supplemento Ordinario n. 8, 342 pp. C-MIT 7/2019 - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circolare n. 7 del 21/01/2019, Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.35 del 11/02/2019 - Supplemento Ordinario n. 5.



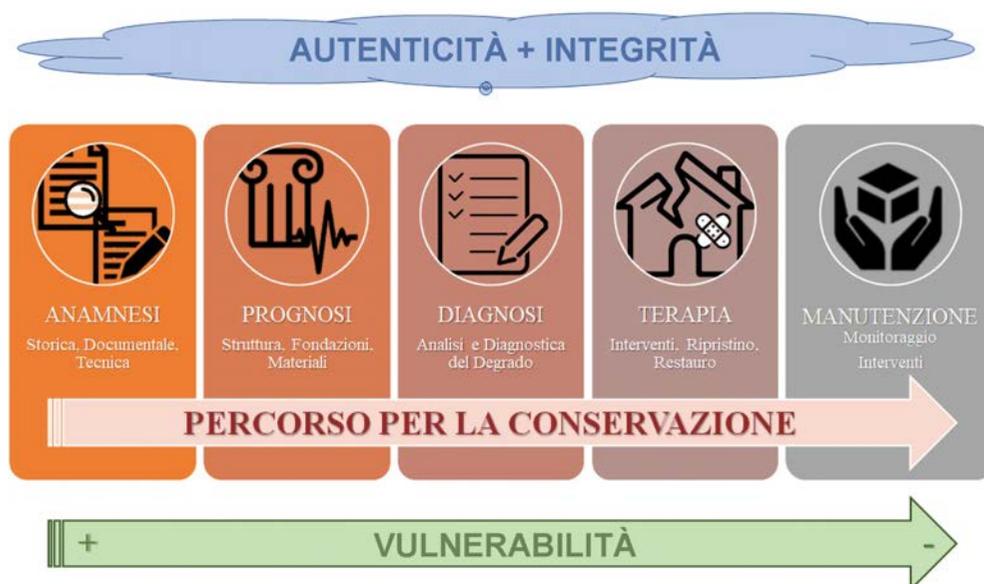


Fig. 2
Esemplificazione del percorso della conoscenza in un contesto di rispetto dei principi di Autenticità e Integrità e con il fine di diminuire la vulnerabilità (da Coli et al. 2022).

edifici storici, viste le peculiarità e la fragilità, è da affrontare caso per caso ma secondo un flusso sistematico di azioni finalizzate alla conoscenza (Figura 2).

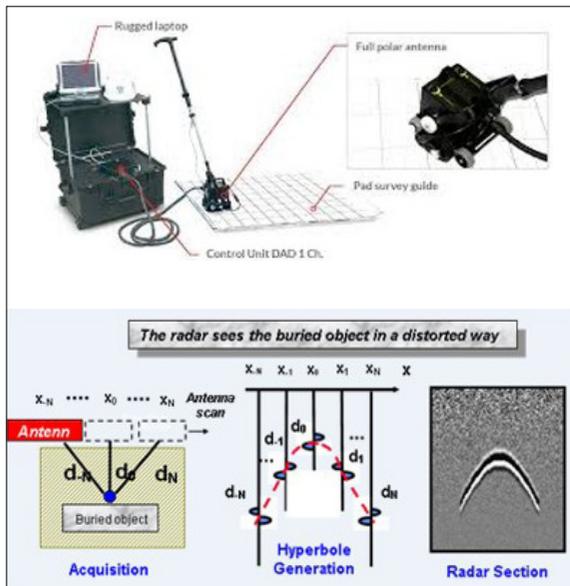
Le Linee Guida dedicano un intero capitolo (Punto 6.1) alla definizione del percorso della conoscenza del manufatto, per il quale forniscono un vademecum relativo alle fasi da affrontare per l'acquisizione di tutte le conoscenze preliminari che consentono la messa a punto di un modello affidabile per le successive verifiche numeriche, con particolare riguardo alla definizione della conoscenza sull'assetto strutturale dell'edificio ed alla definizione della consistenza materiche sulle murature e degli impalcati.

In riferimento alla sede dell'Opificio in via degli Alfani 78 a Firenze, nell'ambito di un generale Accordo Quadro di collaborazione tra Opificio e DST, ex Art.15 L. 241/1990, è stato sviluppato un programma di studi e ricerche propedeutici alla verifica sismica dell'edificio, in cui particolare attenzione è stata posta nella definizione della struttura degli impalcati in quanto l'edificio è adibito ad uffici pubblici e museo.

Il fronte su via Alfani dell'edificio è nato come convento nel XVII secolo, quindi nel XIX secolo è stato ampliato con l'ala retrostante e negli anni 1967-1974 è stato oggetto di profonda trasformazione, con ulteriori interventi negli anni 1990 e 2000; in mancanza di adeguata documentazione tecnica la ricostruzione storica e della tipologia e modalità degli interventi è stata lunga e complessa, ed ha richiesto una lunga ed approfondita fase di indagini conoscitive svolte secondo le indicazioni del Punto 6.1.1 delle LG MI-BACT 2011 con metodologie NDT (Georadar, soniche, termografiche) e LDT (DAC-Test, endoscopiche, locali stonacature).

Le indagini sono state mirate alla definizione di tipologia, assetto, apparecchiatura e stato di conservazione delle murature ed alla definizione della struttura degli impalcati. La definizione della struttura degli impalcati assume particolare importanza in quanto si tratta di un edificio pubblico/museo con accesso al pubblico e funzioni amministrative.

Le indagini Georadar sono state le più diffuse ed hanno riguardato tutte le pareti ed i solai, dando ottimi riscontri conoscitivi, in particolare riguardo agli impalcati.



Le indagini Georadar

Le indagini Georadar (GPR Ground Probing Radar) sono comunemente utilizzate per indagare oggetti del sottosuolo, contatti litologici, faglie e fratture nella massa rocciosa e per definire unità di suolo e il livello della falda freatica; il GPR applicato anche per indagare il calcestruzzo in ponti e gallerie e per la durabilità del legante; solo di recente, il GPR è stato introdotto per indagare la struttura e l'assemblaggio della muratura².

Il GPR utilizza il tempo di viaggio bidirezionale tra un input elettromagnetico ad alta frequenza nella gamma radar 100 MHz-100 GHz e il suo ritorno; l'input radar viaggia nel materiale a una velocità principalmente correlata alla sua conduttività magnetica e permeabilità. Il contatto tra materiali con diverse proprietà elettromagnetiche retrodiffonde parzialmente il segnale all'antenna. L'acquisizione GPR viene solitamente eseguita muovendo l'antenna lungo un rilievo lineare e il risultato è un profilo 2D del segnale elettromagnetico retrodiffuso dalle caratteristiche interne del materiale esaminato in funzione del tempo di percorrenza. Quest'ultimo può essere convertito in profondità, fornendo così la struttura geometrica 2D del mezzo. Il grado di penetrazione del segnale nel materiale è una funzione delle proprietà del materiale e della frequenza del segnale: più bassa è la frequenza, maggiore è la penetrazione ma minori sono i dettagli dell'indagine perché sono una funzione della lunghezza d'onda. La conoscenza della velocità dell'onda nel mezzo indagato o quella del suo spessore è di grande aiuto per un'analisi corretta (Figura 3).

Nell'ambito dei rilievi alla sede dell'Opificio delle Pietre Dure in via Alfani 78 a Firenze, i rilievi georadar sono stati eseguiti con le antenne C-thru a 2GHz e RIS ONE a 400 MHz (Figura 4), fornite nell'ambito del Progetto Next Generation UE dal Partner di Progetto IDS Georadar S.p.A., part of Hexagon, che ha attiva già da anni una collaborazione scientifica con il DST.

Particolare attenzione è stata dedicata allo studio degli orizzontamenti e alla restituzione delle specifiche stratigrafie.

Il corpo di fabbrica principale in origine presentava esclusivamente sistemi voltati o lignei, ma oggi è caratterizzato da una alta varietà di tipologie di strutture orizzontali dovuti agli

Fig. 3

In alto: antenna e sistema di acquisizione Georadar; in basso: principio della riflessione dell'onda georadar e del rilevamento di un corpo secondo l'effetto doppler (elaborazione M. Coli).

Fig. 4

In alto: antenna C thru; a in basso: antenna RIS ONE; entrambe di IDS Georadar S.p.A., part of Hexagon (elaborazione IDS).

² Sul tema si rimanda alla bibliografia a fine contributo.

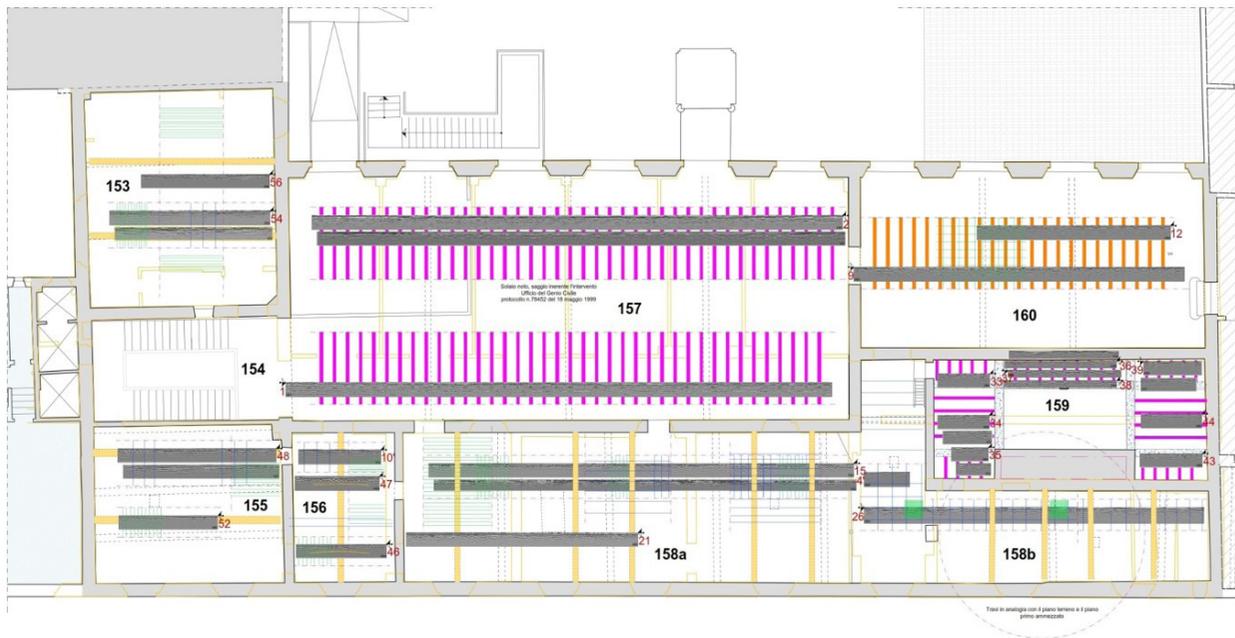
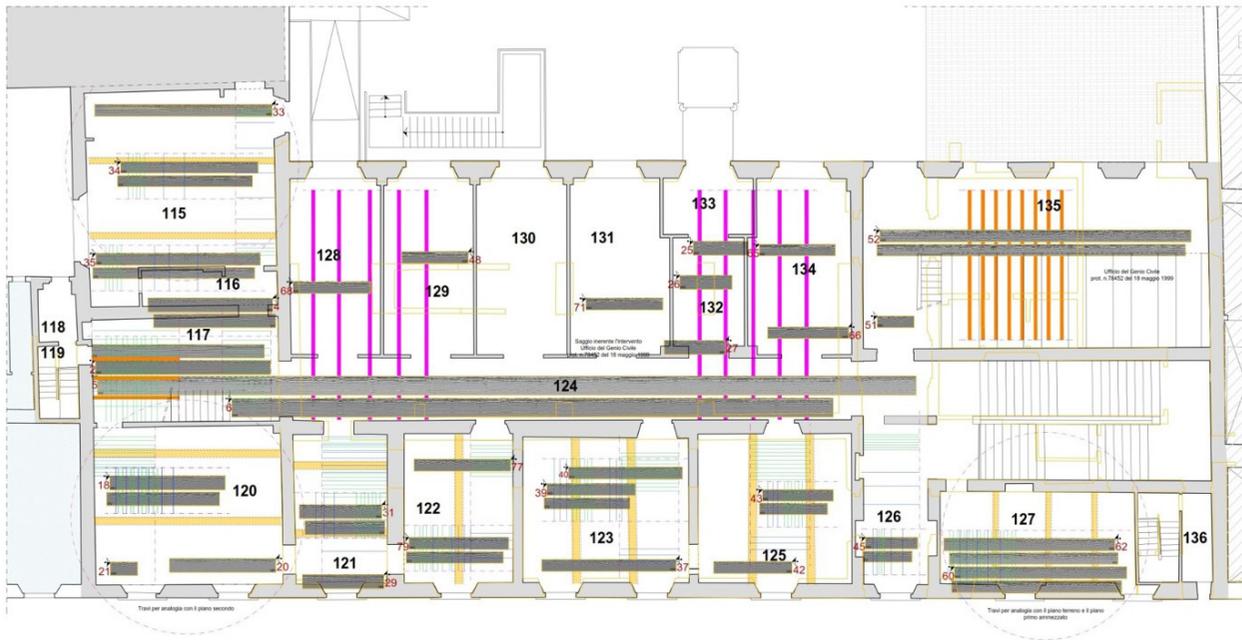
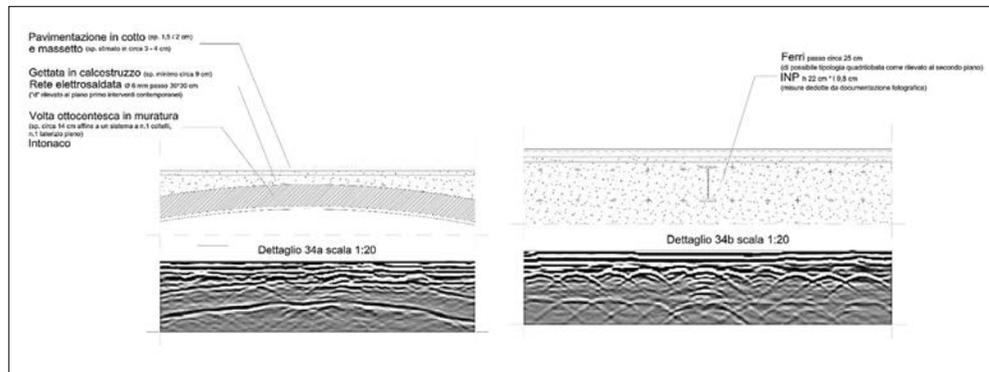


Fig. 5
 Schema delle indagini georadar sui solai dei vari piani stanza per stanza (elaborazione B. Paoletti).
 a) Indagini georadar piano primo
 b) Indagini georadar piano secondo

Fig. 6
 Esempi di interpretazione stratigrafica della struttura degli impalcati presenti (elaborazione B. Paoletti).



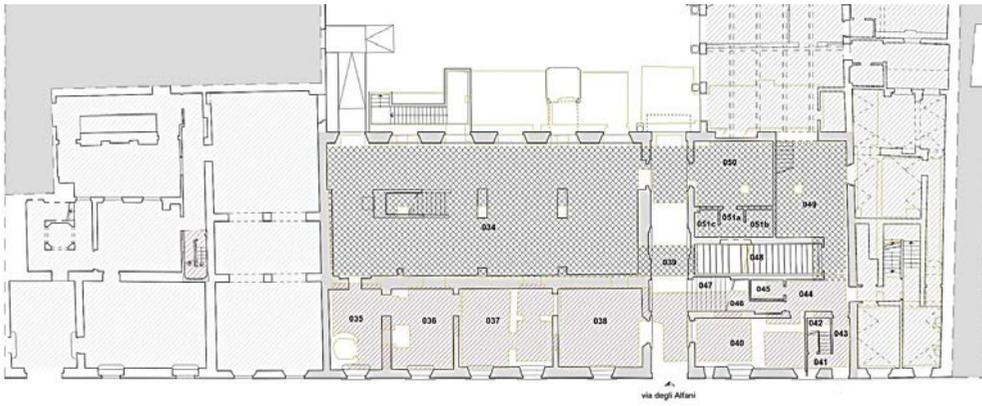
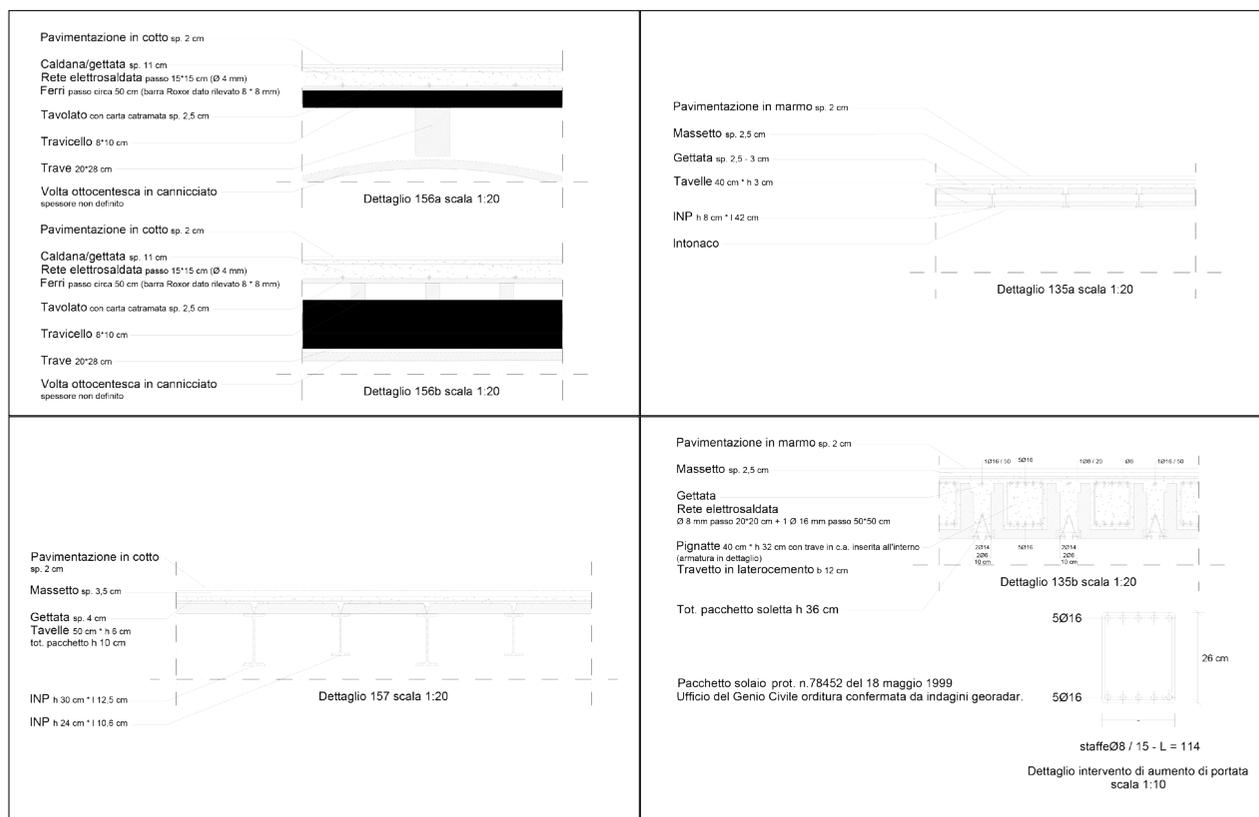


Fig. 7
 Attribuzione dei vari solai per
 i vari piani (elaborazione B.
 Paoletti).
 a) Piano terreno
 b) Piano primo
 c) Piano secondo
 d) Legenda





³ Si ringraziano i colleghi e collaboratori che negli anni hanno reso possibile questa ricerca e la sua positiva conclusione: Prof. Paola Vanucchi, Responsabile del progetto; Prof. Emanuele Marchetti, Responsabile rilievi Georadar, sonici e termografici; Dr. Ph.D. Barbara Paoletti, Coordinamento Operativo, analisi e redazione; Dr. Ph.D. Tessa Donigaglia, Dr. Ph.D. Giacomo Belli, Dr. Ph.D. Duccio Gheri, Dr. Giacomo Risaliti, Dr. Jacopo Nesi, Dr. Agnese Gasparotti, Dr. Alessia Francesca Napoli, supporto operativo (gli Sherpa! - mai troppo ringraziati...). Si ringrazia anche l'Ufficio Tecnico dell'OPD pienamente coinvolto negli anni nella ricerca e nelle varie scelte operative, ed infine il personale tutto dell'Opificio per la pazienza e collaborazione prestata durante tutto il periodo di indagini, nonostante i disagi subiti.

interventi del XX secolo, dei quali questi non sempre è risultata reperibile la documentazione, ed ove reperita risulta spesso lacunosa e non specifica rispetto agli aspetti richiesti dalla vigente normativa. Pertanto, le estese indagini georadar sugli impalcati hanno mirato a colmare queste lacune

Sulla base di indagini archivistiche, georadar, saggi e perforazioni in sito, per ogni ambiente è stata ricostruita la specifica stratigrafia del vari solai di interpiano.

Per ogni stanza i solai sono stati indagati con strisciate trasversali e longitudinali così da cogliere al meglio l'orditura degli impalcati (Figura 5).

Risultati

L'attenta analisi critica dei vari radargrammi (Figura 6), connessa alle scarse notizie disponibili per i vari orizzontamenti, ha portato a definire i dettagli stratigrafici dei vari impalcati, e da questi le varie tipologie di impalcati presenti (Tab.1), che sono confluite in un abaco, poi utilizzato per attribuire ogni solaio ad una determinata tipologia (Figure 7-8)³.

Sistemi voltati quattrocenteschi (piano terra, lato via degli Alfani)
Sistemi voltati ottocenteschi con cappa armata del 1967 (piano terra, lato cortile)
Solai lignei ottocenteschi interessati da interventi di consolidamento risalenti al 1967-1974 (piani primo e secondo, lato via degli Alfani)
Solai in acciaio (profilati INP) risalenti al 1967 - 1974 (piani primo e secondo, lato cortile)
Solaio in laterocemento risalente al 1967-1974 con intervento di incremento di portata del 1999 - 2000 (piano, lato cortile)
Solaio a putrelle in acciaio risalente al 1967-1974 (piano, lato cortile)
Solaio in laterocemento risalente al 1967-1974 (piano secondo, lato cortile)
Solaio ligneo di copertura ottocentesco interessato da manutenzioni nel corso del Novecento e presumibilmente fra il 1967 e il 1974 (copertura, lato via degli Alfani)
Solaio ligneo di copertura ottocentesco interessato dal rifacimento del pacchetto fra il 1967 e il 1974 con mantenimento delle originali capriate lignee e realizzazione del cordolo in c.a. (copertura, lato cortile)
Solaio ligneo di copertura ottocentesco interessato da manutenzioni presumibilmente fra il 1967 e il 1974 con mantenimento delle originali capriate lignee (copertura, lato cortile)
Lucernario su scalone monumentale in c.a. realizzato presumibilmente fra il 1967 e il 1974 (copertura, lato via degli Alfani)

pagina a fronte

Fig. 8
Esempi delle tipologie di impalcati riconosciuti ed usati (elaborazione B. Paoletti).

in questa pagina

Tab. 1
Tipologie di impalcati riconosciuti (elaborazione B. Paoletti).

Bibliografia

- COLI M., PAPESCHI P., BOSCAGLI F., INNOCENTI L., AGOSTINI B. 2018, *GPR investigation on the masonry of the Brunelleschi's Cupola, Florence (Italy)*, «Giornale delle prove non distruttive, Monitoraggio, Diagnostica», n. 38/1, pp. 52-57, ISSN 1721-7075.
- COLLINS M.E. 1992, *Soil Taxonomy: A Useful Guide for the Application of Ground Penetrating Radar*, in Hanninen P., Autio S. (Eds.), *Proceedings of Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 8-13 June 1992, Rovaniemi, Finland, pp. 125-132.
- MAIERHOFER C., LEIPOLD S., SCHAURICH D., BINDA L., SAISI A. 1998, *Determination of the Moisture Distribution in the Outside Walls of S. Maria Rossa Using Radar*, in *Proceedings of 7th International Conference on Ground Penetrating Radar*, Kansas, USA, 27-30 May 1998, pp. 509-514.
- FERNANDO E. 1992, *Highway Speed Pavement Thickness Surveys Using Radar*, Final report prepared for the Federal Highway Administration, Texas Transportation Institute, College Station, USA.
- PIERACCINI M., FRATINI M., PARRINI F., MACALUSO G., ATZENI C. 2004, *High-Speed CW Step-Frequency Coherent Radar for Dynamic Monitoring of Civil Engineering Structures*, «Electron Letters», n. 40, pp. 907-908.
- COLI M., DONIGAGLIA T., PAPESCHI P., BOSCAGLI F. 2018, *GPR Investigation for Historical Masonry: Case Histories from Florence (Italy) Cultural Heritage Monumental Buildings*, in *3rd International Conference on Techniques, Measurements & Materials in Art & Archaeology*, Jerusalem, Israel, 9-12 December 2018.
- ANNAN A.P., WALLER W.M., STRANGWAY D.W., ROSSITER J.R., REDMAN J.D., WATTS R.D. 1975, *The Electromagnetic Response of a Low-Loss, 2-Layer, Dielectric Earth for Horizontal Electric Dipole Excitation*, «Geophysics», n. 40, pp. 285-298.

Applicazioni del GPR per l'analisi degli intonaci di supporto a pitture murali: il caso studio della cappella Bardi a Firenze

Emanuele Marchetti

emanuele.marchetti@unifi.it

Dipartimento di Scienze della
Terra (DST), Università degli
Studi di Firenze

pagina a fronte

Fig. 1
Firenze, Basilica di Santa
Croce, Cappella Bardi.

Abstract

In the framework of the Heritage Ground Penetrating Radar (HGPR) project, the Department of Earth Sciences of the University of Florence (DST) performed GPR measurements to investigate plasters supporting mural paintings. This study presents an acquisition approach of GPR data adapted to detect the subtle (cm) thickness of plasters, well below the standard GPR application. In order to increase the signal-to-noise ratio of GPR data we performed punctual measurements, with acquisition lasting at least 10 seconds in each point. Moreover the interpolation of 4 cm thick polystyrene level between the antenna and the wall, transparent to electromagnetic waves, allows to increase the time difference between subsequent reflections from the different levels, therefore improving our ability to identify shallow discontinuity positioned at depth well below the wavelength of the adopted signal. The methodology has been experimented in the Bardi Chapel in Florence, currently undergoing restoration activity.

Key-words

Georadar, Mural painting, Plaster, Non Destructive Testing.

Introduzione

Le attività di manutenzione e restauro delle pitture murarie è strettamente connessa alla conoscenza delle murature ed intonaci di supporto in termini di spessore e disomogeneità. Numerose tipologie di indagine sono state sperimentate per questo scopo sfruttando tecniche termometriche (per identificare differenze nell'emissività termica dei materiali) (Mouhoubi K. et al. 2019), interferometriche, per individuare differenze modalità di vibrazione, fluorescenza a raggi X e spettroscopia Raman (Freire-Lista D.M. et al. 2023; Sfarra S. et al. 2016) oltre ad indagini con GPR (Ground Penetrating Radar) (Ortega-Ramírez J. et al. 2021) dove si sfrutta la capacità delle onde elettromagnetiche di propagarsi in un mezzo ed essere riflessa da stratificazioni e/o irregolarità (Jol H.M., 2009). In questo studio presentiamo un nuovo approccio di indagine GPR per studiare lo spessore e l'andamento degli intonaci di supporto alle pitture murarie e mostriamo un caso studio della Cappella Bardi a Firenze.



Le indagini Georadar

Sviluppato a partire dagli anni 1960 per le indagini nel sottosuolo, la tecnica di GPR sfrutta la capacità di un'onda elettromagnetica di propagarsi all'interno di un mezzo e di essere riflessa in corrispondenza di variazione di materiale (discontinuità) e/o disomogeneità nel mezzo (Jol H.M., 2009). Il GPR si compone di quindi di un'antenna trasmittente, che emette in modalità pulsata un'onda elettromagnetica, e di un'antenna ricevente che registrando il segnale di ritorno permette di identificare eventuali impulsi riflessi e di definire così la geometria del materiale in cui si è verificata la trasmissione dell'onda (Seyfried D., Schoebel J., 2015). Per passare dal ritardo con cui si registrano i segnali riflessi alla geometria dei riflettori è necessari conoscere la velocità di propagazione dell'onda del mezzo che varia tipicamente tra 10 a 15 cm/ns (Tillard S., Dubois J.C., 1995), decisamente più bassa di quella in aria (30 cm/ns). In modo analogo alle tecniche di sismica a riflessione, il calcolo della velocità di propagazione del mezzo può essere ottenuto dall'identificazione di iperboli che si originano in corrispondenza di elementi riflettenti puntiformi come conseguenza della modalità di acquisizione standard, che prevede una scansione lungo la superficie del materiale da indagare volta a definire un radar-gramma (Figura 2).

Un altro aspetto essenziale che deve essere considerato nell'applicazione di tecniche GPR è la risoluzione che viene comunemente considerata pari a un quarto della durata dell'impulso emesso (W). Impulsi riflessi che differiscono meno di questa grandezza sono generalmente indistinguibili. Dato che la durata dell'impulso diminuisce all'aumentare della frequenza, si prediligono antenne ad alta frequenza per indagare discontinuità molto vicine tra loro, a scapito di una riduzione dello spessore totale investigato.

In questo studio abbiamo utilizzato un C-Thru XS prodotto da IDS Georadar s.r.l. (part of Hexagon), con una frequenza pari a 2 GHz con due coppie di antenne polarizzate. Considerando la frequenza tipica dello strumento la durata dell'impulso prodotto è pari a 0.25 nsec (Figura 3).

Risultati

Le procedure di acquisizione standard prevedono di effettuare scansioni lineari, anche secondo una griglia predefinita, che poi combinate forniscono un'immagine tridimensionale del corpo analizzato. La Figura 4 mostra un esempio di indagine tomografica effettuata su una porzione di pittura muraria della cappella Bardi interessata da una lacuna realizzata durante i restauri del XX secolo (Frosinini C., Monciatti A., 2011)¹. L'analisi evidenzia perfettamente la lacuna senza però fornire indicazioni sull'eventuale eterogeneità dello spessore dell'intonaco, e poi permette di caratterizzare la muratura nel suo insieme in accordo con le attività consolidate di analisi delle murature (Maierhofer C., Leipold S., 2001).

Sebbene l'analisi fornisca indicazioni sull'estensione in profondità della lacuna, preclude la possibilità di investigare la porzione più superficiale dell'intonaco perché prevede, come primo passo, la rimozione dell'impulso trasmesso (Figura 3), identificata con il termine "Dewow" (Sferra S. et al. 2016) per rimuovere appunto tale effetto dal segnale riflesso rappresentativo del mezzo investigato. Considerando infatti una velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nella muratura di circa 12 cm/ns, rimuovere l'impulso diretto, che ha una durata di circa 0,5 ns (Figura 3), corrisponde ad una distanza percorsa dall'onda trasmessa e riflessa (Figura 2a) di 6 nsec e preclude di registrare riflessioni da parte di elementi/superfici posizionate nei primi 3 centimetri di profondità, dove invece ci attendiamo eventuali informazioni relative agli intonaci di supporto alle pitture murarie.

¹ <https://opificiodellepietredure.cultura.gov.it/wp-content/uploads/2024/09/2-Bardi-la-storia-e-i-restauri.pdf>

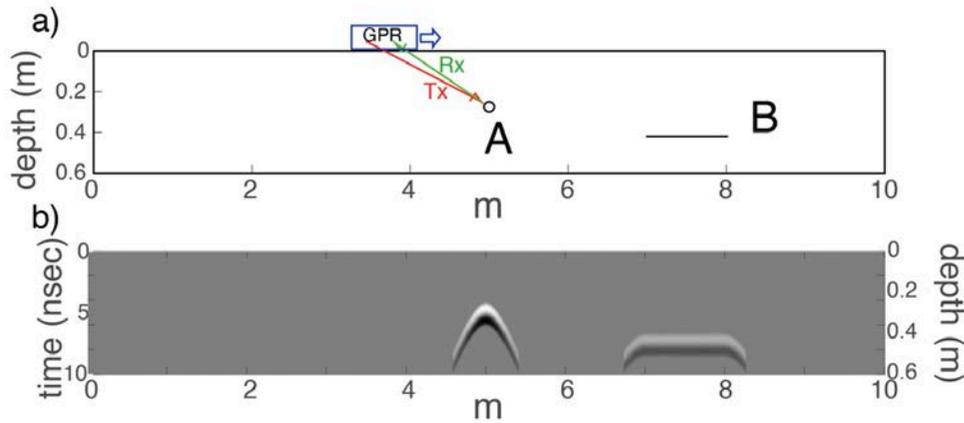


Fig. 2
Schematizzazione della procedura di acquisizione dati GPR con scansione lineare dell'antenna su una superficie piana (a) e radargramma sintetico (b) prodotto da due riflettori con simmetria puntiforme (A) e lineare (B).

Fig. 3
Georadar C-Thru XS (a) ed esempio dell'impulso trasmesso e registrato dall'antenna ricevente (blu) mantenendo il georadar sospeso in aria, senza che quindi ci siano riflessioni da parte di superfici esterne. La traccia rossa è ottenuta come la blu ma interponendo un blocco di polistirolo (vedi Figura 6).

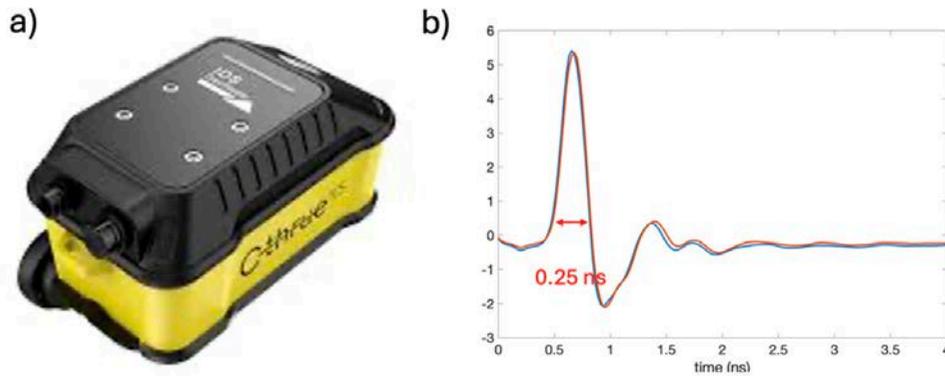
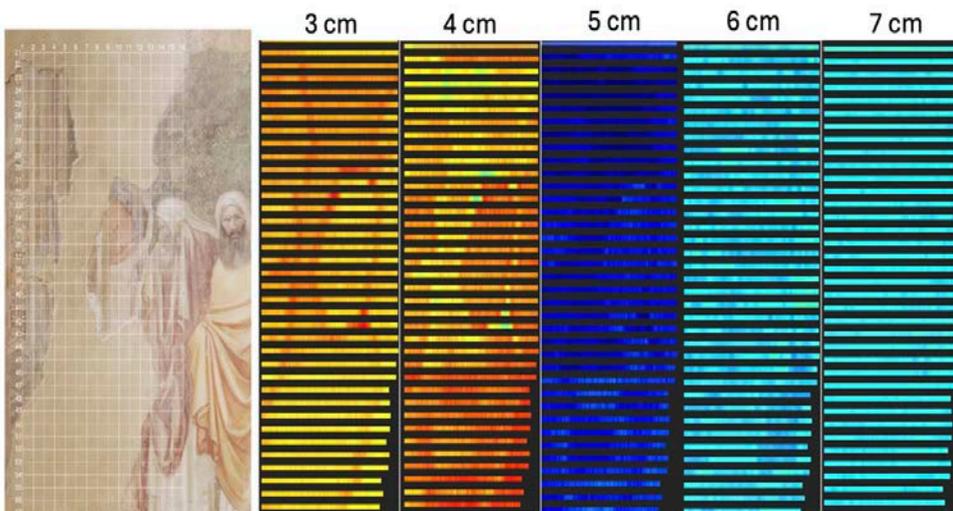


Fig. 4
Esempio di acquisizione a griglia con C-Thru XS su una porzione della pittura muraria e indagine tomografica corrispondente (realizzata con il software IQmaps), che ben evidenzia la lacuna (fino a 4 cm di profondità dalla superficie della parete) e la muratura omogenea oltre 6 cm di profondità.



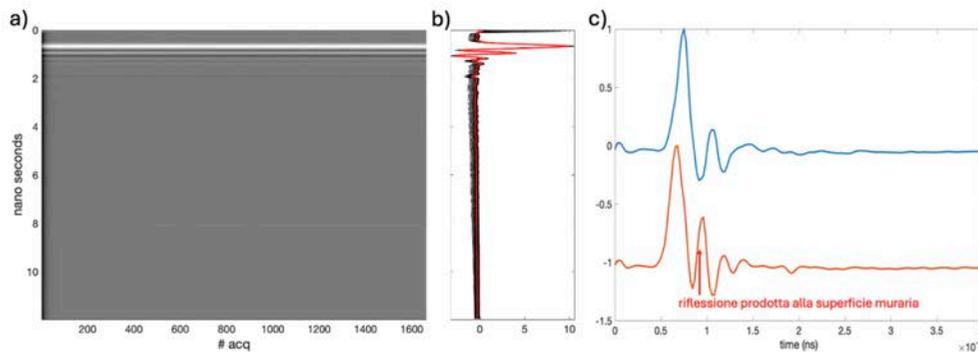
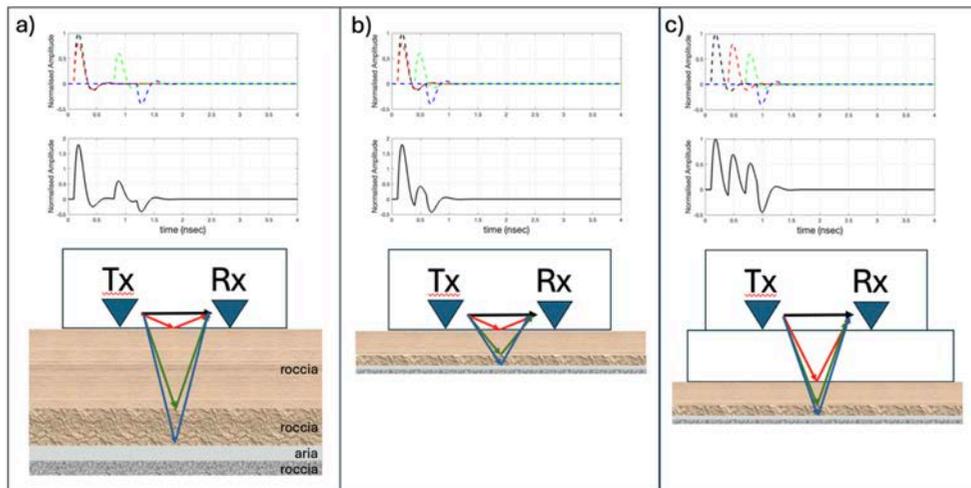
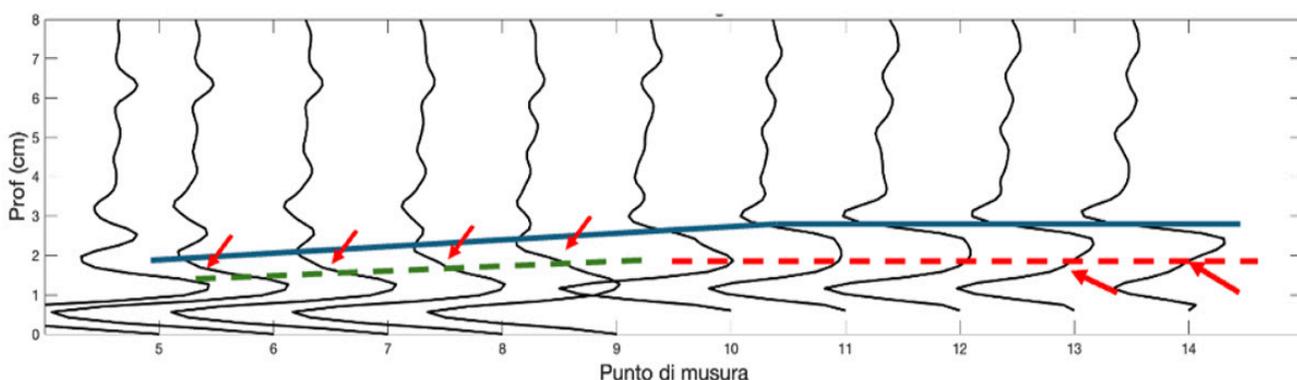
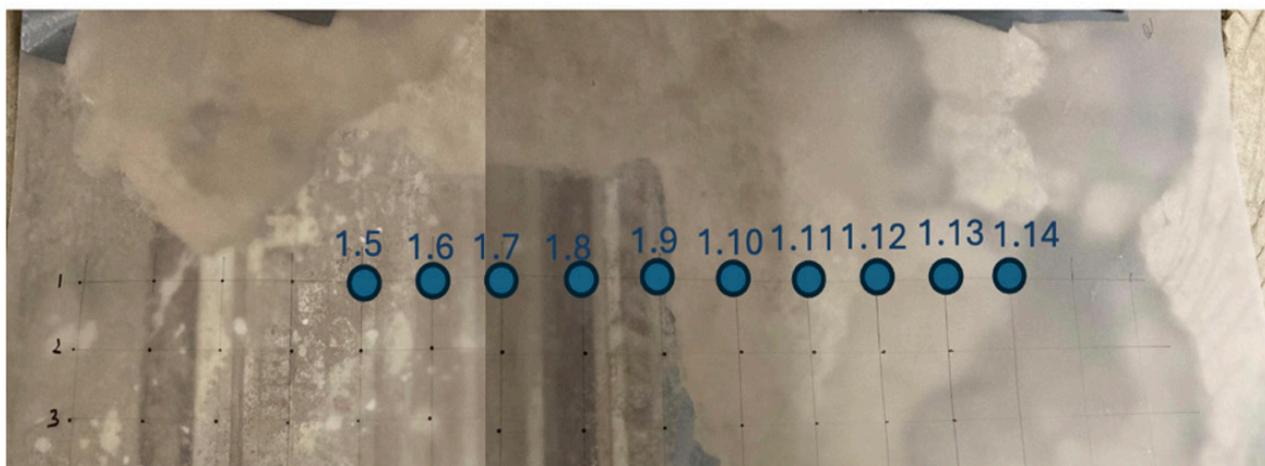


Fig. 5
Schematizzazione dei vari impulsi di riflessione (tracciati tratteggiati in alto) e del tracciato risultante (traccia nera) in relazione a varie stratigrafie e interponendo un blocco di polistirolo tra georadar e su-perficie da analizzare (c).

Fig. 6
Esempio di acquisizione prolungata in uno stesso punto (a) e calcolo del segnale medio (b, rosso) come media dei singoli tracciati acquisiti (nero). c) Tracciato medio acquisito con (rosso) e senza (blu) polistirolo interposto tra il radar e la superficie.

La Figura 5 rappresenta una schematizzazione del problema e della soluzione proposta. Nei tre esempi si propone una stratigrafia che determina 3 riflessioni, dalla superficie (rosso tratteggiato), da un contatto tra due tipologie di materiale (ad esempio intonaco/intonaco, verde tratteggiato) e da un contatto tra materiale ed aria (blu tratteggiato) che potrebbe rappresentare un'intercapedine nel supporto e che determina in termini di onda elettromagnetica un'inversione nella polarità del segnale riflesso. In tutti i casi il segnale risultante (traccia nera) risulta dalla somma dell'impulso diretto (nero tratteggiato) e gli impulsi riflessi. Nel caso rappresentato in Figura 5a, dove gli strati sono sufficientemente spessi, le due riflessioni sono sufficientemente chiare a rimuovere l'impulso diretto (Dewow) non determinerebbe perdita di informazione. Nel caso descritto in Figura 5b, dove si considerano spessori ridotti, si osserva come le riflessioni si perdano dentro l'impulso diretto, mostrando come la sua rimozione determinerebbe una significativa perdita di informazione e precluderebbe la possibilità di ricostruire la stratificazione reale. Questo risulterebbe invece possibile se si interponesse tra il georadar e la superficie uno spessore noto di materiale trasparente alle onde elettromagnetiche (Figura 5c). Per lo studio sperimentale dei supporti murari alle pitture murali di Giotto nella Cappella Bardi della Basilica di Santa Croce a Firenze abbiamo quindi utilizzato un blocco di polistirolo dello spessore di 4 cm, interposto tra il radar e la muratura. Test preliminari mostrano infatti come questo non modifichi l'impulso principale, suggerendo che possa essere considerato trasparente per l'onda elettromagnetica (Figura 3b).

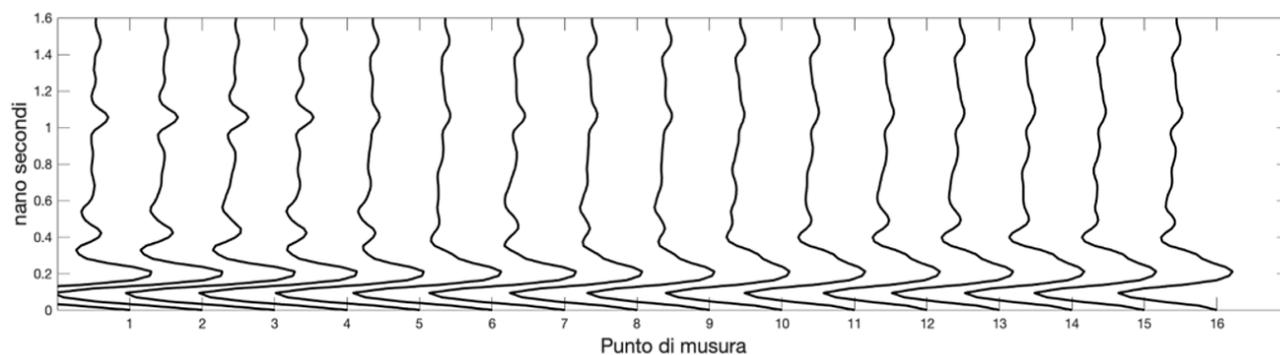


Inoltre, per massimizzare il rapporto segnale rumore abbiamo effettuato misure puntuali, svincolate dall'encoder a ruota, acquisendo dati nello stesso punto per un intervallo di tempo di 10 sec (Figura 6a) e ottenuto il tracciato medio come somma dei singoli tracciati acquisiti (Figura 6b).

Dall'analisi di Figura 6 è evidente come il segnale medio permetta di migliorare il rapporto segnale rumore per essere quindi maggiormente rappresentativo della stratigrafia. Inoltre, il confronto tra dato acquisito nello stesso punto con (rosso) e senza polistirolo (blu), mostra come i due tracciati siano diversi e come solo disaccoppiando l'antenna sia possibile identificare la riflessione da parte della superficie (picco secondario identificato dalla freccia in Figura 6c) e di conseguenza rimuovere l'impulso diretto e avere una rappresentazione più rappresentativa della stratigrafia superficiale.

Questo approccio, una volta applicato su alcuni punti del supporto murario della parete 3 della cappella (Figura 7) mostra come il segnale, corretto per la geometria della parete, sia diverso da punto e punto, e permetta di identificare un ispessimento dell'intonaco per passare alla murature (linea blu), dove il segnale riflesso è omogeneo su tutta l'area, mostri dei flessi che suggeriscono la presenza di un secondo impulso che potrebbe rappresentare la sovrapposizione di due intonaci (linea verde tratteggiata) e, nei punti 10.11 e successivi, mostri un flesso compatibile con un impulso a polarità inversa che determina un aumento della durata del picco negativo e potrebbe suggerire la presenza di un'intercapedine.

Fig. 7
Esempio di acquisizione: 10 punti della parete 3 a cavallo di una lacuna e relativi tracciati medi (tracce nere). Ai tracciati, acquisiti con polistirolo per disaccoppiare l'antenna, è stato rimosso l'impulso diretto, sono stati convertiti in profondità assumendo una velocità di 12 cm/ns, e corretti per la geometria della superficie di acquisizione.



² Si ringraziano i colleghi e collaboratori che hanno reso possibile questa ricerca e la sua positiva conclusione: in particolare si ringrazia il Prof. Massimo Coli per il coordinamento della ricerca e i continui scambi, la Dott.ssa Alessia Francesca Napoli per le analisi e le acquisizioni del dato, i dott. Paolo Papeschi e Davide Morandi per il supporto tecnico nelle procedure di analisi ed elaborazione e la dott. ssa Mariarosa Lanfranchi per gli aspetti legati al restauro e le critiche attente e costruttive. Si ringrazia l'Opera di Santa Croce per il supporto logistico e l'accesso al sito. Le ricerche sono state effettuate nell'ambito del progetto Heritage Ground Penetrating Radar, CUP B55F21007810001, finanziato all'interno del Bando di Ateneo per il finanziamento di Progetti di ricerca a carattere "Problem-driven" da svolgersi attraverso la costituzione di partenariati pubblico-privati nell'ambito delle tematiche PNRR, a valere sulle risorse di cui al DM 737/2021, che si inserisce nelle iniziative finanziate dall'Unione Europea - Next Generation EU.

Un'acquisizione analogha effettuata sulla parete 1 in un'area apparentemente omogenea della pittura muraria (Figura 8), mostra un ispessimento progressivo dell'intonaco da sinistra a destra e un flesso nel picco negativo nei punti di acquisizione da 10 in poi, che indica la sovrapposizione di due impulsi e quindi una superficie di discontinuità nel supporto murario, presumibilmente imputabile a due livelli di intonaci sovrapposti. Tale interpretazione è compatibile con l'andamento degli intonaci che si osserva poco più in basso nella stessa area in corrispondenza di una lacuna e in accordo con indagini effettuate sulla parete attraverso la tecnica interferometrica DHSPI, che evidenzia nella porzione destra dell'acquisizione uno spostamento legato alla presenza di possibili fratture (Chaban A. et al. 2025).

Considerazioni finali

La caratterizzazione degli intonaci e delle murature è un aspetto essenziale per la manutenzione e il restauro di pitture murarie. Tuttavia, a causa dei ridotti spessori investigati, il GPR vede ancora solo poche applicazioni. In questo contributo si è presentata una nuova procedura di acquisizione che mira a migliorare la rappresentatività del dato per fornire indicazioni su riflessioni da parte di superfici, anche capillari nei primi centimetri di spessore. Le prime acquisizioni sperimentali effettuate nella Cappella Bardi a Firenze sono promettenti suggerendo un'applicazioni più diffusa di detta metodologia².

Bibliografia

- MOUHOUBI, K., DETALLE, V., VALLET, J.-M., BODNAR, J.-L. 2019, *Improvement of the Non-Destructive Testing of Heritage Mural Paintings Using Stimulated Infrared Thermography and Frequency Image Processing*, «J. Imaging», vol. 5, n. 72, DOI:10.3390/jimaging5090072.
- FREIRE-LISTA D.M., VÁZQUEZ, E., BARREIRO CASTRO, P., SALAVESSA, E., COSTA M.D.R., MOREIRA, R., AND LÓPEZ, A.J. 2023, *Mural Paintings Characterisation Using X-ray Fluorescence and Raman Spectroscopy – A Case Study: Nossa Senhora das Neves Chapel, Vilar de Perdizes, Galicia – North Portugal Euroregion*, «Heritage», n. 6, pp. 7277-7292, DOI:10.3390/heritage6120382.
- SFARRA S., IBARRA-CASTANEDO C., TORTORA M., ARRIZZA L., CERICHIELLI G., NARDI I., MALDAGUE X. 2016, *Diagnostics of wall paint-ings: A smart and reliable approach*, «Journal of Cultural Heritage», n. 18, pp. 229-241, DOI:10.1016/j.culher.2015.07.011.
- ORTEGA-RAMÍREZ J., BANO M., VILLA ALVARADO L.A., MEDELLÍN MARTÍNEZ D., RIVERO-CHONG R., MOTOLÍNÍA-TEMOL C.L. 2021, *High-resolution 3-D GPR applied in the diagnostic of the detachment and cracks in pre-Hispanic mural paintings at “Templo Rojo”, Cacaxtla, Tlaxcala, Mexico*, «Journal of Cultural Heritage», n. 50, pp. 61-72, DOI:10.1016/j.culher.2021.06.008.
- JOLH.M. 2009 (Ed.), *Ground penetrating radar theory and application*, Elsevier Science, The Boulevard, Oxford, DOI:10.1016/B978-0-444-53348-7.X0001-4.
- SEYFRIED D., SCHOEDEL J. 2015 *Detection capability of a pulsed Ground Penetrating Radar utilizing an oscilloscope and Radar-gram Fusion Approach for optimal signal quality*, «Journal of Applied Geophysics», n. 118, pp. 167-174, DOI:10.1016/j.jappgeo.2015.03.029.
- TILLARD S., DUBOIS J.C. 1995, *Analysis of GPR data: wave propagation velocity determination*, «Journal of Applied Geophysics», vol. 33, nn. 1-3, pp. 77-91, [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90031-4).
- FROSININI C., MONCIATTI A. 2011, *Il progetto di studio della tecnica e dello stato di conservazione delle pitture murali di Giotto nella Basilica di Santa Croce, finanziato dalla Getty Foundation*, «OPD Restauro», n. 23, pp. 215-220.
- MAIERHOFER C., LEIPOLD S. 2001, *Radar investigation of masonry structures*, «NDT & E International», vol. 34, n. 2, pp. 139-157.
- CHABAN A., TORNARI V., ANDRIANAKIS M., LANFRANCHI M.R., ROCCO A., BERTASA M., STRIOVA, J. 2025, *Digital Holographic Speckle Pattern Interferometry in Support of Ongoing Conservation: The Case of Giotto’s Wall Paintings in the Bardi Chapel, Florence*, <https://ssrn.com/abstract=5276099>.

pagina a fronte

Fig. 8

Esempio di acquisizione: 16 punti della parete 1 a cavallo di una frattura e relativi tracciati medi (tracce nere). Ai tracciati, acquisiti con polistirolo per disaccoppiare l'antenna, è stato rimosso l'impulso diretto.

Indagini non distruttive con neutroni: alcuni casi di studio, da minuscole filigrane dorate a catene di ferro giganti

Daniela Di Martino

daniela.dimartino@unimib.it

Dipartimento di Fisica “Giuseppe Occhialini”
Università degli Studi di Milano-Bicocca

pagina a fronte

Fig. 1

Alcuni frammenti della filigrana dorata che adorna la Croce di Chiaravalle, oggetto di analisi con neutroni (credit Franco Blumer).

Abstract

Neutrons, as a function of their energy and wavelength, are highly penetrating in matter and allow non-invasive analysis in materials, therefore being a well-suited tool to support heritage science studies. The Physics Department at the University of Milano-Bicocca has long standing collaborations with neutron facilities worldwide, and has coordinated several measurements campaigns in heritage science. In particular, two case studies will be presented. The first, concerning the characterization of the iron tie rods of the Milan Cathedral that act as a static consolidation between the pillars. The second, concerning the analysis of tiny gold filigrees of the Chiaravalle Cross, a precious and complex masterpiece of jewelry, preserved at the Milan Cathedral Museum.

Key-words

Non-destructive investigations, Neutron imaging, Milan Cathedral tie-rods, Chiaravalle Cross.

Introduzione

Si può vedere una rosa in un contenitore di piombo? Questa domanda provocatoria vuole porre l'attenzione su cosa riescono a vedere i nostri occhi e su possibili indagini che possono ottenere dettagli invisibili alla nostra vista.

Nel campo del patrimonio culturale le campagne di indagini scientifiche rivestono sempre più importanza. Anche le persone più esperte (dallo storico dell'arte, al restauratore e al conservatore) hanno spesso l'esigenza di ottenere risposte sulla composizione dell'opera (per individuare le materie prime ed eventuali provenienze geografiche e storiche), sulla tecnologia di produzione e sulla collocazione cronologica. Le indagini scientifiche sono sempre più all'avanguardia e possono fornire elementi importanti per aiutare lo storico, il restauratore e il conservatore nella lettura approfondita dell'opera, sempre nell'ottica di conoscere, conservare e valorizzare il patrimonio culturale.

Ricordiamo che l'Agenda 2030 (UN, 2030), coi suoi 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs), riconosce l'importanza del patrimonio culturale come strumento per raggiungere la sostenibilità. In particolare, il traguardo 11.4 esorta a potenziare gli sforzi per proteggere e salvaguardare il patrimonio culturale.



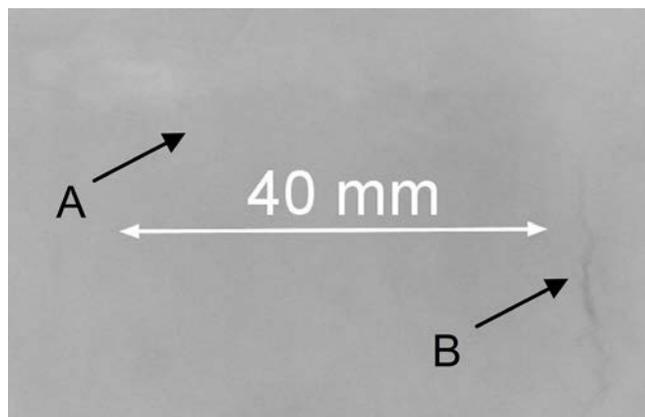


Fig. 2
Cuneo del Duomo di Milano, fotografia -immagine in alto e radiografia con neutroni -immagine in basso, dove due difetti sono indicati dalle frecce (A e B) (credit Veneranda Fabbrica e BNC, Budapest).

Tra le tecniche all'avanguardia e non distruttive per analizzare materiali, strutture e composizioni di oggetti d'arte e reperti archeologici ci occuperemo in particolare di quelle che utilizzano fasci di neutroni.

Il neutrone è una particella neutra: non ha carica elettrica e può penetrare la materia in profondità, interagendo coi materiali in diversi modi, a seconda degli elementi che li compongono. I nuclei di alcuni elementi (come B, Li, Cd e Gd) catturano i neutroni incidenti a bassa velocità. Altri materiali (per es. quelli contenenti Al o Pb) interagiscono poco coi neutroni (sono praticamente trasparenti). I neutroni, in funzione della loro energia e della loro lunghezza d'onda, hanno un'elevata penetrazione nella materia e consentono un'analisi non invasiva e non distruttiva dei materiali. Sono quindi uno strumento particolarmente adatto negli studi di caratterizzazione dei beni culturali. Il Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini" dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca ha una collaborazione di lunga data con molte infrastrutture di ricerca con sorgenti di neutroni in tutto il mondo e ha coordinato diverse campagne di misura, tutte non distruttive, per lo studio del patrimonio culturale (Di Martino et al. 2018a; Di Martino D. et al. 2018b; Di Martino et al. 2019).

Le tecniche neutroniche sono tutt'ora poco utilizzate, forse per la difficoltà di non poter ancora svolgere misure *in situ*. I più diffusi metodi di misura basati sui neutroni e le loro applicazioni nel campo dei beni culturali sono raccolti in una recente pubblicazione (Kardjilov, Festa 2017); in particolare, l'imaging neutronico ha molte potenzialità per caratterizzare diverse tipologie di materiali in vari settori (Kardjilov et al. 2011). Nel seguito verranno brevemente esposti due casi studio significativi.

Imaging neutronico di catene di ferro provenienti dal Duomo di Milano

Le catene del Duomo di Milano sono degli elementi di rinforzo (contro le spinte laterali) applicate tra le colonne a circa 30 metri di altezza. Essendo stati posizionati in opera più di 500 anni fa, sono comunque soggetti a degrado, e una catena nel 2012 è stata trovata una catena rotta, che è stata sostituita con una catena di fabbricazione recente. La catena originale è diventata oggetto di studio tramite diverse tecniche di analisi (anche da parte del Politecnico di Milano, che coordina varie azioni di monitoraggio del Duomo di Milano).

Sono sempre più necessari studi multidisciplinari e, se possibile, non distruttivi per valutare lo stato di conservazione. Lo studio condotto mirava ad una caratterizzazione

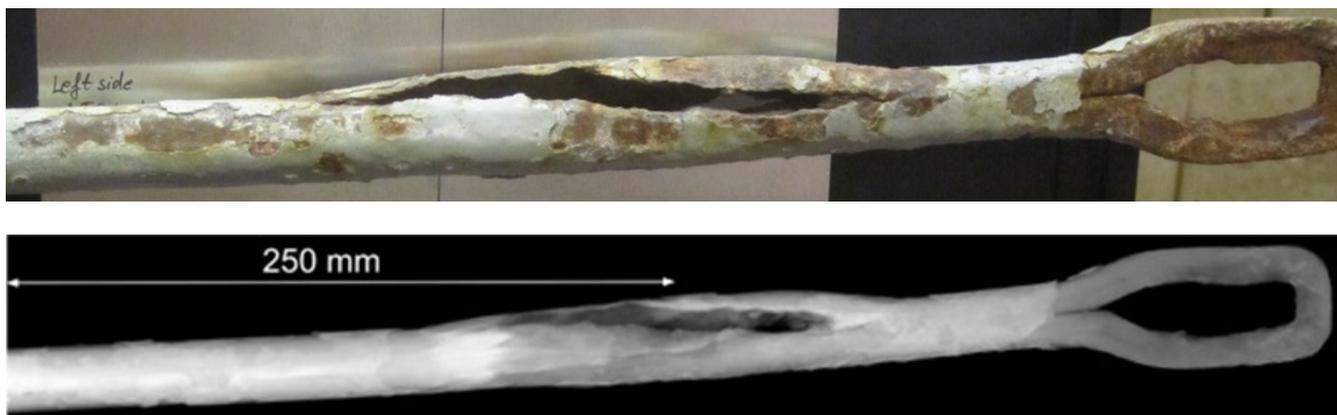


Fig. 3
Catena (esterna al Duomo di Milano), fotografia -immagine in alto e radiografia con neutroni -immagine in basso, dove alcune fratture interne sono ben visibili (credit Veneranda Fabbrica e BNC, Budapest).

più approfondita del materiale e all'identificazione dei difetti locali, anche per fare poi un confronto con tecniche differenti utilizzabili *in situ*.

Dopo una campagna di misura presso il centro ISIS-RAL (UK) di una porzione di questa catena fratturata (lunga 80 cm, per una sezione di 8cm x 8cm), sono stati eseguiti ulteriori esperimenti di imaging di neutroni termici sulla stazione di imaging RAD del Centro Neutroni di Budapest su un cuneo (coevo alla catena sostituita) e ad altre catene di ferro. I dettagli di questi esperimenti sono stati pubblicati (Di Martino et al. 2018b) ed alcuni dettagli sono visibili nella figura 2. Nella figura 2a due difetti del cuneo di ferro sono indicati dalle frecce. La crepa contrassegnata da A era visibile a occhio nudo; la crepa contrassegnata da B era invece nascosta. Quest'ultima dev'essere quindi posizionata nella parte interna del corpo di ferro, in questo caso più o meno perpendicolarmente alla superficie.

La cricca B ha una lunghezza di circa 20 mm e una larghezza di circa 0,7 mm. Tali vuoti visibili o nascosti possono indebolire notevolmente la resistenza del materiale. Nella figura 3 sono ben riconoscibili le crepe allungate nel materiale dell'asta lunga. Queste crepe non erano visibili a occhio nudo. Il percorso dei vuoti segue la curvatura del corpo di ferro. Ciò indica che la tensione e le sollecitazioni su questa parte del tirante erano troppo elevate; forse non solo per questo tirante, ma anche per altri. Altri dettagli e osservazioni tecniche sono comunque disponibili in letteratura (Di Martino et al. 2018b). Le indagini con neutroni hanno permesso di evidenziare in maniera non distruttiva la presenza di difetti interni al materiale che non erano stati identificati con altre tecniche, consentendo quindi di testare anche metodologie adatte al monitoraggio *in situ*.

La filigrana della Croce di Chiaravalle

La Croce di Chiaravalle è una croce processionale risalente alla seconda metà del duecento, donata, secondo la tradizione, dal Vescovo e Signore di Milano Ottone Visconti all'abate di Chiaravalle Paolo da Besana (XIII secolo). Si tratta di una complessa costruzione di oreficeria, costituita da lamine d'argento e dorate, in abbinamento a filigrane, cristalli, gemme, pietre dure, cammei, diaspro rosso.

La particolarità di quest'opera, di proprietà dei Padri Oblati, ma custodita dal Museo del Duomo di Milano, è che diversi tratti stilistici appaiono chiaramente successivi alla presunta epoca di realizzazione. La croce è stata restaurata nell'ambito della

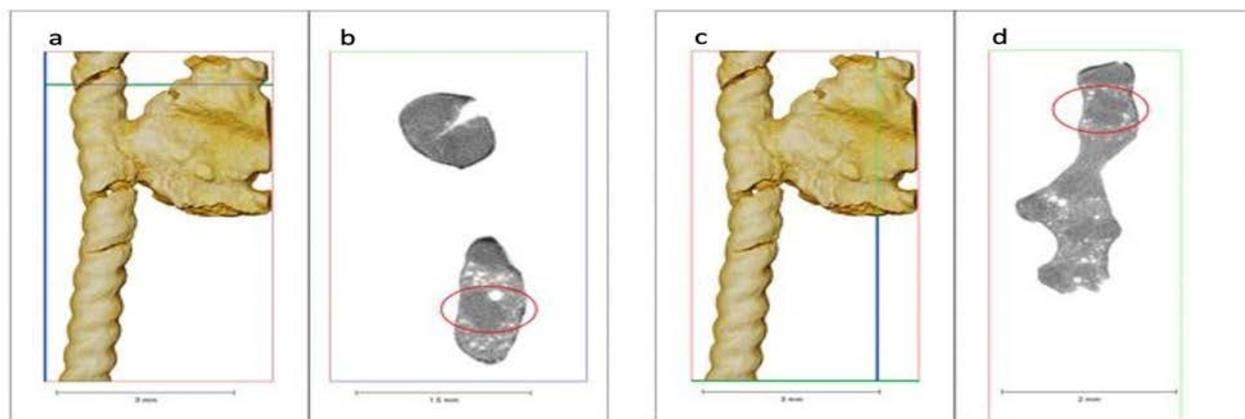


Fig. 4

Nei 4 riquadri sono mostrate le riproduzioni della filigrana (a, c) e le corrispondenti sezioni ottenute dalla tomografia neutronica.

La prima sezione è mostrata in b (lungo la linea verde in a) e una seconda sezione si trova in d (lungo la linea verde mostrata in c). In entrambe le sezioni i cerchi rossi evidenziano delle forme squadrate e non tonde (che si riferiscono proprio alla sezione del filo che compone la filigrana).

XVII edizione di Restituzioni (2016), programma biennale di restauri di opere d'arte appartenenti al patrimonio del Paese, promosso e curato da Intesa Sanpaolo, in collaborazione con la Soprintendenza Belle Arti e Paesaggio per le province di Milano, Bergamo, Como, Lecco, Lodi, Monza-Brianza, Pavia, Sondrio e Varese, e ammirata all'interno della mostra "La Bellezza Ritrovata", a Gallerie d'Italia (piazza della Scala, Milano, aprile-luglio 2016).

Durante il restauro, il Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano-Bicocca, insieme a diverse realtà universitarie e private, ha eseguito varie indagini scientifiche relative alla natura dei materiali ed alla datazione del manufatto. I principali risultati sono stati presentati in un convegno e pubblicati (Benati, Di Martino 2017, Di Martino et al. 2019). Recentemente, vista la difficoltà nell'identificare la tecnologia di produzione della filigrana, è stato condotto un nuovo esperimento di imaging neutronico ad alta risoluzione spaziale presso la facility ANSTO (Sydney, Australia) su un piccolo campione di filigrana dorata. I risultati (Vigorelli et al. 2025) riguardano soprattutto la morfologia del filo, come evidenziato dalla figura 4, dove sono mostrate le immagini in varie sezioni (ottenute dalla tomografia a neutroni). In particolare, i cerchi rossi mettono in evidenza delle sezioni di fili non tonde, ma squadrate, suggerendo che possano essere state usate trafilate quadrate e non tonde, come consuetudine veneziana nel XIII secolo (si veda per esempio Costanza Cucini, in Benati, Di Martino 2017).

Conclusioni

In conclusione, abbiamo mostrato come le tecniche neutroniche siano state impiegate in modo efficace nello studio di due manufatti significativi: minuscoli frammenti di un'antica filigrana dorata e imponenti catene di ferro. Il vantaggio principale è stato che tutte le tecniche basate su neutroni sono non invasive e non distruttive.

Sono stati eseguiti con successo esperimenti di imaging termico-neutronico su tiranti in ferro provenienti dal Duomo di Milano restituendo lo stato di conservazione degli esemplari e fornendo indicazioni sulle tecniche di fabbricazione. Inoltre, le immagini acquisite potrebbero essere un test di confronto per nuove tecniche di monitoraggio da utilizzare *in situ*.

Per quanto riguarda la filigrana dorata della Croce di Chiaravalle ulteriori informazioni rilevanti sul filo utilizzato si trovano nelle immagini tomografiche: è stato confermato l'uso di un filo a sezione quadrata, visibile soprattutto nelle sezioni laterali della parte a

spirale. Questa indicazione sarebbe molto importante per l'associazione alla produzione veneziana di filigrana nel XIII secolo (ulteriori ricerche bibliografiche sono in corso).

Questi casi studi dimostrano che presso i laboratori di ricerca dotati di sorgenti di neutroni possono essere indagati sia campioni molto piccoli che campioni molto grandi, senza preparazione o campionamento e in modo non invasivo quando altre tecniche sono inefficaci.

Dobbiamo però menzionare anche alcuni punti deboli. I neutroni sono costosi e non facilmente disponibili, e gli oggetti devono essere trasportati e conservati in modo sicuro. L'interazione dei neutroni è debole e quindi spesso è necessario un lungo tempo di misurazione e l'attivazione deve essere presa in considerazione con attenzione. Tuttavia, le tecniche basate sui neutroni sono in continua evoluzione e consentono di raggiungere risoluzioni spaziali sempre più elevate e molti dettagli (anche discriminando singole fasi o elementi) all'interno dei manufatti.

Infine, tornando alla domanda di partenza: "si può vedere una rosa all'interno di un contenitore di piombo"? La risposta è sì, se usassimo dei neutroni¹.

¹ Si ringraziano gli enti che hanno messo a disposizione i beni dei casi studi, i curatori, i restauratori e gli storici che hanno collaborato alle campagne di misure, tutti gli *instrument scientists* delle *facilities* presso cui sono state condotte le misure con neutroni e tutti i colleghi che hanno contribuito agli studi (maggiori dettagli sono presenti negli articoli citati).

Bibliografia

- BENATI G., DI MARTINO D. (a cura di) 2017, *La Croce di Chiaravalle. Approfondimenti storicocientifici in occasione del restauro*, atti del convegno, Milano.
- DI MARTINO, D. ET AL. 2018a, *From tiny gold filigrees to majestic iron tie rods: Neutron facilities for the benefit of cultural heritage*, «The European Physical Journal Plus», vol. 133(9). <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-12232-6>.
- DI MARTINO D. ET AL. 2018b, *A neutron diffraction and imaging study of ancient iron tie rods*, «Journal of Instrumentation», vol. 13(5). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/C05009>.
- DI MARTINO D. ET AL. 2019, *The Chiaravalle Cross: Results of a Multidisciplinary Study*, «Heritage», vol. 2(3), pp. 2555-2572. <https://doi.org/10.3390/heritage2030157>.
- DI MARTINO D. ET AL. 2025, *When from Technology Comes Beauty: A Glass-Gem Case Study to Promote Inclusive and High-Quality Learning Paths in Heritage Science*, «Heritage», vol. 8(2), p. 41. <https://doi.org/10.3390/heritage8020041>.
- KARDJILOV N. ET AL. 2011, *Neutron imaging in materials science*, «Materials Today», vol. 14 (6), pp. 248-256. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(11\)70139-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(11)70139-0).
- KARDJILOV N., FESTA G. 2017 (Eds.), *Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage*, Springer.
- RESTITUZIONI, 2016 in *Restituzioni. Tesori Restaurati*, edizione 2016, Croce di Chiaravalle-[https://restituzioni.com/opere/croce-di-chiaravalle/\(05/2025\)](https://restituzioni.com/opere/croce-di-chiaravalle/(05/2025)).
- UN 2030, *Agenda 2030, United Nations*. Available online: [https://sdgs.un.org/2030agenda\(05/2025\)](https://sdgs.un.org/2030agenda(05/2025)).
- VIGORELLI L. ET AL. 2025, *High resolution neutron tomography as non-invasive tool for the study of a filigree from the Medieval Chiaravalle Cross*, «Archaeological and Anthropological Sciences», vol. 17, p. 138. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12520-025-02254-y>.

Il bene e il suo contesto: il monitoraggio termografico e ambientale, metodo integrato per orientare strategie di conservazione e verificarne l'efficacia

Monica Volinia
monica.volinia@polito.it

Mario Girotto
mario.girotto@polito.it

Dipartimento di Architettura
e Design (DAD), Politecnico di
Torino

pagina a fronte

Fig. 1
Cappella di Sant'Eldrado. Setup
di rilievo termografico della
parete sud (foto LabDIA, 2014).

Abstract

Long-term monitoring of the Chapel of Sant'Eldrado at Novalesa Abbey has been crucial in developing integrated analytical methods to support conservation strategies. The research, since 2012 assessed the preservation of the chapel's frescoes. Thermographic and environmental monitoring have underlined the importance of thermal fluctuations on the walls, rather than water infiltration or condensation, as the primary cause of decay. These findings led to the development of corrective actions to mitigate environmental factors contributing to the deterioration, including installing a natural heat shield that stabilized the temperature on the affected walls. This integrated approach proved essential for tracking, addressing, and preventing the ongoing degradation and emphasized the importance of continuous monitoring. It also highlighted the value of collaboration between professionals and institutions to ensure the long-term protection and preservation of the chapel's historical and artistic heritage.

Key-words

Cultural Heritage, Conservation strategies, Infrared thermography, Environmental monitoring.

Introduzione

L'opportunità di condurre un monitoraggio non invasivo nel lungo periodo su di un bene di particolare pregio storico-artistico ha consentito di mettere a punto metodologie di analisi integrate fondamentali per la definizione di strategie per la conservazione. L'impiego imprescindibile di tecniche non distruttive sta permettendo, in questa fase, di valutare l'efficacia degli interventi attuati, reversibili, anche nella prospettiva di un'eventuale azione correttiva a maggior impatto rispetto a quanto attualmente proposto.

La Cappella di Sant'Eldrado dell'Abbazia della Novalesa manifesta da oltre cinquant'anni problematiche di conservazione del pregevole ciclo di affreschi che ne qualifica le superfici interne. Per questo motivo nel 2012 la Provincia di Torino, ora Città Metropolitana e attuale proprietaria del complesso abbaziale, ha deciso di affidare una campagna di ac-





Fig. 2
Cappella di Sant'Eldrado. Vista
da nord (foto LabDIA, 2022).



Fig. 3
Abbazia della Novalesa.
Monastero (foto Luca
Tomassone, 2015).

quisizioni termografiche al Laboratorio di Diagnostica non distruttiva del Politecnico di Torino. I singoli rilievi all'infrarosso si sono inevitabilmente trasformati in monitoraggio e la complessità del caso ha reso necessaria una ricerca approfondita sui meccanismi di interazione tra manufatto e ambiente. Lo studio si è avvalso del contributo dell'Arpa Piemonte (2013-2023) e ha ricevuto un significativo impulso a partire dal 2021 quando, grazie al sostegno economico ottenuto dalla Fondazione Compagnia di San Paolo¹, il Team di Ricerca ha potuto avvalersi di nuove figure professionali. Tutte le attività sono state condotte sotto la supervisione dei funzionari della Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per la Città Metropolitana di Torino (SABAP-TO)².

Oggetto di studio

La Cappella di Sant'Eldrado è una delle quattro cappelle medievali del complesso abbaziale della Novalesa, antico monastero benedettino situato a circa 70 km da Torino in direzione ovest, verso la Francia (Figure 2-3).

Ubicata su uno sperone roccioso, venne costruita all'inizio dell'XI secolo su una preesistenza preromanica che custodiva la tomba di Eldrado, abate di Novalesa nella prima metà del IX secolo.

La struttura è a navata unica con abside semicircolare; la muratura, a vista, è costituita da conci lastroidi e ciottoli³. I fronti esterni settentrionale e meridionale non presentano ornati, mentre l'abside è caratterizzata da una decorazione ad archetti pensili binati. La facciata è preceduta da un atrio edificato nella seconda metà del XVII secolo.

La superficie interna è interamente ricoperta da un importante ciclo di affreschi, realizzato tra il 1096 e il 1097, testimonianza della pittura medievale nell'ambito del romanico lombardo (Figura 4).

All'interno della Cappella sono visibili alterazioni cromatiche coerenti con la presenza di fronti di umidità ascendente. L'apparato decorativo è generalmente ben conservato, fatta eccezione per la parete sud, dove è presente degrado diffuso, particolarmente evidente nella perdita parziale del registro pittorico inferiore.

Anamnesi degli interventi pregressi

La fase iniziale della ricerca ha riguardato l'analisi dei documenti d'archivio (Volpi, 2014) con la finalità di ricostruire lo stato di conservazione diacronico dell'edificio attraverso gli interventi di manutenzione e restauro effettuati nel tempo.

Le prime informazioni reperite risalgono alla fine del XIX secolo e documentano il buono stato di conservazione degli interni della Cappella. Alfredo de Andrade nella sua raccolta di schizzi relativi all'Abbazia appunta relativamente agli affreschi di Sant'Eldrado che «[...] Queste pitture sarebbero quasi tutte di una conservazione perfetta se non fosse stato un recente restauro ad olio» (1883)⁴.

Nel 1956 sono documentate problematiche legate a infiltrazioni dal terreno dovute alla vegetazione che interessano la Cappella nella zona absidale, ma è a partire dal 1976 che si rintracciano missive che denunciano il profondo stato di degrado in cui versano gli affreschi. Le cause indicate sono relative a infiltrazioni dalla copertura e all'imbibizione delle murature per capillarità e per infiltrazione dall'esterno.

Dall'analisi delle fonti emergono due interventi che potrebbero essere stati determinanti nel contribuire al peggioramento dello stato di conservazione dell'edificio: la rimozione dell'intonaco a copertura dei paramenti esterni nel 1967 e, sul lato sud, la riapertura nel 2004 della monofora già tamponata a fine XI secolo per dare continuità al ciclo di affreschi.

¹ Bando "PRIMA, Prevenzione Ricerca Indagine Manutenzione Ascolto per il patrimonio culturale"; Progetto finanziato "Gli intonaci dipinti del complesso abbaziale di Novalesa, dal restauro alla conservazione preventiva", 2021-25.

² Il Gruppo di Ricerca è composto dai seguenti attori. Politecnico di Torino-DAD: M. Volinia, M. Girotto, con la collaborazione di S. Troja; Politecnico di Torino-DIST: M. Gomez-Serito; Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Piemonte - ARPA Piemonte: L. Tomassone; Koinè Conservazione Beni Culturali: M. C. Capua, G. Rollo, F. Perossini, L. Micotto; Città Metropolitana di Torino: L. Garavoglia, M. Di Salvo; Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per la Città Metropolitana di Torino: V. Moratti.

³ Secondo M. Gomez Serito «La muratura della Cappella è realizzata secondo i parametri di massima qualità vigenti nel territorio subalpino nell'XI secolo. Tale caratteristica si esplicita per l'impiego di conci in forma di spesse lastre di pietra posate insieme a ciottoli calibrati con l'impiego abbondante di ottima malta di calce. Tale posa prevede la continuità trasversale tra il lato esterno e quello interno del muro secondo livelli subparalleli dove i ciottoli disposti a 'spinapesce' completano, per equivalente spessore, il piano di posa individuato dai conci», 2025.

⁴ GAM - GALLERIA CIVICA D'ARTE MODERNA E CONTEMPORANEA DI TORINO, GABINETTO DISEGNI E STAMPE [LT 91], *Fondo d'Andrade*, fl/8253, «Novalesa - Abbazia, Cappella di San Eldrado, finestre», 1883.

La Cappella negli anni è stata oggetto di continuo controllo da parte degli Enti di tutela e di importanti interventi volti a migliorarne lo stato di conservazione⁵. Ciononostante, le superfici interne dipinte hanno continuato a presentare degradi talora importanti che hanno imposto l'impiego di approfondite indagini scientifiche volte alla valutazione del sistema edificio/ambiente.

Attività e risultati del monitoraggio ambientale e termografico

Dal 2012 la Cappella è stata oggetto di indagini termografiche, tuttora in corso, con lo scopo di monitorare il processo di degrado evidente soprattutto sul fianco interno esposto a sud (Volinia, Girotto, 2023).

Il punto di partenza per una corretta diagnosi termografica è la conoscenza dei parametri ambientali al contorno sia durante le prove che nel periodo che le precede. A tal fine all'interno dell'edificio sono stati installati due data logger per monitorare i parametri di temperatura e umidità relativa dell'aria⁶. Tuttavia, per una valutazione oggettiva dell'influenza dell'ambiente sui magisteri murari, risultava necessario condurre nel contempo delle misurazioni meteorologiche.

L'Abbazia della Novalesa, situata su un altipiano a 828 m sul livello del mare, gode di condizioni ambientali peculiari per la zona, influenzate dalla catena montuosa circostante che determina un clima generalmente secco e ventoso, difforme da quanto rilevato dalle stazioni presenti sul territorio anche a pochi chilometri di distanza. Per questo motivo l'ARPA Piemonte, in un'ottica di collaborazione tra Enti, ha installato una stazione meteorologica in prossimità della Cappella che ha consentito il rilievo dei dati di temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento, radiazione solare e precipitazioni. Tale stazione è rimasta attiva per dieci anni, e attualmente è stata sostituita da una nuova centralina gestita dal team di ricerca⁷.

La Cappella di Sant'Eldrado è stata oggetto di analisi termografiche con la finalità di mappare eventuali fronti evaporativi, valutare la distribuzione termica sulle pareti interne e monitorare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni osservati. Le campagne all'infrarosso – ventitré nell'arco di tredici anni – sono state condotte in condizioni ambientali e stagionali differenti sfruttando il gradiente termico naturale tra l'interno e l'esterno dell'edificio. Le acquisizioni non si sono avvalse dell'impiego di stimolazione termica artificiale, né di ventilazione forzata per non alterare ulteriormente lo stato di conservazione degli affreschi già compromesso dalla presenza di umidità. Fin dalle prime fasi di acquisizione, il segnale IR ha rivelato l'influenza significativa dell'orientamento delle pareti, la cui sezione misura circa 70 cm, sull'andamento termico delle superfici interne, evidenziando l'assenza di discontinuità nella struttura muraria.

Oltre alle acquisizioni qualitative condotte sull'intera superficie affrescata, i protocolli impiegati hanno previsto l'effettuazione di scansioni in continuo della durata variabile tra 48 e 96 ore, da postazione fissa, con due termocamere operanti in contemporanea su porzioni di pareti interne esposte a nord e a sud. Tali rilievi hanno permesso di valutare l'andamento nel tempo della temperatura superficiale media di aree campione definite in base ai degradi visibili e alle anomalie termiche riscontrate nelle prime campagne termografiche.

In particolare, sul fronte interno esposto a sud, la temperatura varia sensibilmente in funzione delle condizioni ambientali esterne, riflettendo l'andamento periodico dello stimolo termico solare, ma con uno sfasamento di circa 12 ore rispetto alla temperatura dell'aria esterna e una fluttuazione giornaliera di circa 1,5°C. Al contrario, la parete settentrionale mantiene una temperatura pressoché stabile nel tempo, indipendentemente

⁵ La realizzazione di un'intercapedine attorno al suo perimetro (1978); il rifacimento della copertura (1984); la stuccatura dei giunti delle pareti esterne possibile veicolo d'acqua a seguito della rimozione dell'intonaco (1985); vari cicli di pulitura e restauro delle superfici dipinte e rimozione dei rattoppi in gesso. Inoltre, a seguito dei monitoraggi termografici sono state adottate ulteriori azioni correttive: per limitare il degrado dovuto al ponte termico generato dall'apertura della monofora, si è optato per riempire nuovamente la sezione muraria (Capua et al., 2016); il sistema di illuminazione è stato sostituito con lampade a Led per ridurre gli aumenti localizzati di temperatura sui dipinti ed è stato ridotto il numero di visitatori per ogni gruppo che, essendo troppo numerosi e concentrati in un breve periodo, causavano aumenti repentini improvvisi della temperatura.

⁶ Dal 2012 al 2021 Data Logger TESTO 174H; dal 2021 Sistema WiFi TESTO Saveris 2H.

⁷ Dal 2013 al 2023 Stazione meteorologica MAWS; dal 2023 Stazione meteo DAVIS VANTAGE PRO2.



dalle condizioni ambientali e stagionali, con un'oscillazione massima tra il giorno e la notte di appena $0,5^{\circ}\text{C}$.

L'analisi dei dati microclimatici e meteorologici acquisiti nell'arco dei tredici anni di ricerca ha evidenziato la significativa influenza delle condizioni meteorologiche sui parametri interni di temperatura e umidità relativa, come peraltro prevedibile essendo l'ambiente solo parzialmente confinato.

Un'attenzione particolare è stata rivolta all'analisi dei dati sulla radiazione solare globale e riflessa per valutarne l'incidenza sulla parete sud. Inoltre, sono stati confrontati i parametri relativi a direzione e velocità del vento, insieme alle precipitazioni cumulate, per verificare le ipotesi formulate nella documentazione tecnica riguardo all'infiltrazione dai giunti come possibile concausa della presenza di umidità. Nel dettaglio, per quanto attiene a quest'ultimo aspetto, si segnala che in generale la zona è soggetta a precipitazioni di scarsa intensità. I venti provengono principalmente dal settore nord-ovest, inclusi quelli che spirano in concomitanza con le precipitazioni. La percentuale di venti che, associati a

Fig. 4
Cappella di Sant'Eldrado.
Affreschi (foto LabDIA, 2023).

pagina a fronte

Fig. 5
Cappella di Sant'Eldrado. Particolari delle pareti nord (a sinistra) e sud (a destra) (foto LabDIA e Koiné Conservazione Beni Culturali, 2023).

precipitazioni superiori a 1 mm/h, impattano direttamente sulla parete sud (calcolata nel settore compreso tra ovest-sud-ovest e est-nord-est) è molto bassa, pari allo 0,6% del totale. Questa percentuale si riduce ulteriormente allo 0,05% per precipitazioni superiori a 4 mm/h, rendendo quindi improbabile l'accumulo di umidità dovuto alla pioggia battente. Tra le possibili cause di degrado non è stato trascurato il fenomeno della condensa superficiale. Considerando la particolare vulnerabilità delle superfici affrescate, è stato sviluppato un protocollo per il calcolo IR del punto di rugiada in modo da evitare il contatto diretto delle sonde con le fragili finiture dipinte⁸. Nella quasi totalità delle verifiche condotte, che comprendono cicli diurni e notturni e diverse condizioni stagionali, la curva del dew-point ottenuta è risultata inferiore a quella della temperatura di parete (in 21 scansioni temporali su 23). I risultati portano pertanto ad escludere che la formazione di condensa superficiale sulle pareti interne sia un fenomeno ricorrente.

Azioni correttive sul bene derivanti dal metodo integrato

In sintesi, dai dati raccolti è emerso che le principali cause di degrado degli affreschi della Cappella di Sant'Eldrado non sono direttamente legate a infiltrazioni di acqua piovana dai giunti o alla condensa superficiale, ma piuttosto alle oscillazioni termiche cui è sottoposta la parete sud. Queste fluttuazioni in presenza di umidità potrebbero favorire la migrazione dei sali in superficie.

Poiché non è possibile intervenire sulla probabile principale fonte di apporto di umidità nelle murature, identificata nelle caratteristiche geomorfologiche del sito⁹, sono state proposte azioni correttive volte a mitigare gli effetti dell'incidenza solare non più attenuata a causa dell'assenza della finitura superficiale.

A tal proposito, il gruppo di ricerca, in collaborazione con l'autorità preposta alla tutela del bene, ha proposto l'installazione di una schermatura termica con l'obiettivo di ottenere, sulla parete sud, un andamento termico simile a quello rilevato sulla superficie nord, che risulta in buono stato di conservazione nonostante il fronte evaporativo visibile all'infrarosso.

La struttura, realizzata con tubi metallici e tavole lignee, è stata installata nel 2018 ed è rimasta *in situ* solo per alcuni mesi, prima di essere rimossa a causa dello sradicamento provocato dall'azione del vento. I risultati delle prime acquisizioni condotte con questo sistema di schermatura hanno fornito evidenze a supporto del raggiungimento dell'obiettivo prefissato, mostrando una riduzione delle escursioni della temperatura superficiale di parete dovute all'incidenza solare.

Grazie al finanziamento della Fondazione Compagnia di San Paolo nell'ambito del Progetto PRIMA, è stato possibile riprendere la sperimentazione, cambiando il sistema di ombreggiamento con l'obiettivo di adottare un approccio a minore impatto visivo. Ciò è stato reso possibile attraverso la posa in opera, nel 2022, di una schermatura naturale, realizzata mediante la piantumazione in vaso di alberi a medio fusto¹⁰ selezionati per la loro resistenza alle temperature caratteristiche dell'ambiente montano in cui si trova l'Abbazia.

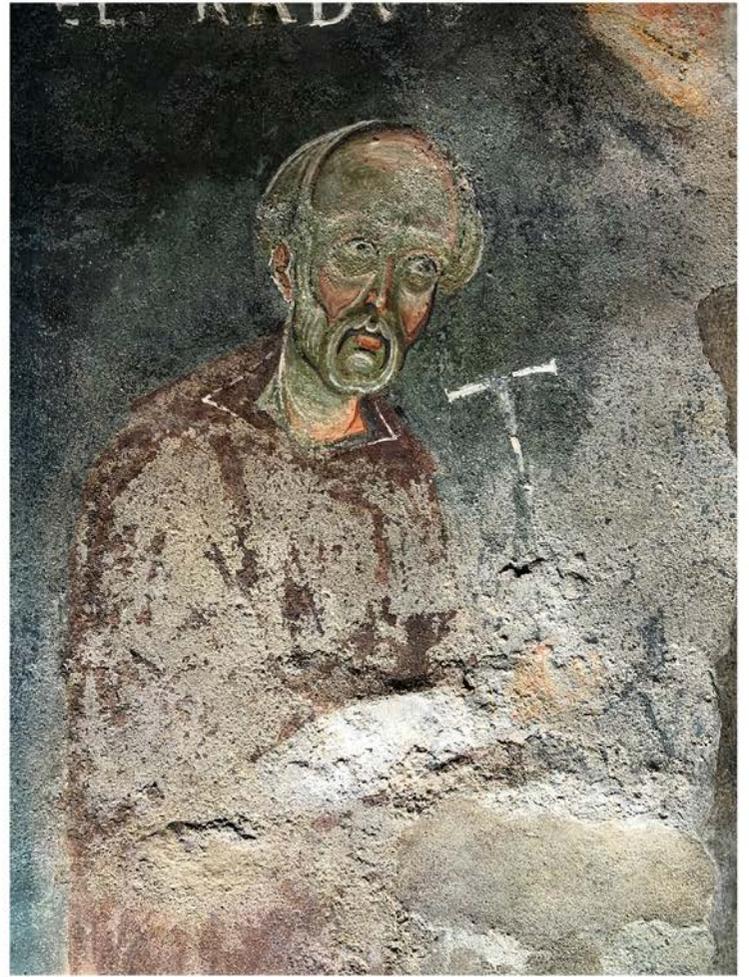
Il monitoraggio termografico di verifica condotto nei due anni successivi ha confermato l'efficacia del sistema proposto, evidenziando, in tutte quattro le campagne condotte, il raggiungimento di un trend termico stabile nel tempo sulla superficie affrescata e confrontabile con quello della parete nord (Figura 6).

A seguito della nuova condizione termica della parete sud, i restauratori hanno avviato sistematiche campagne di controllo delle superfici, che finora non hanno evidenziato la formazione di particolari nuove alterazioni.

⁸ Le misurazioni della temperatura superficiale con sonde a contatto condotte nelle prime campagne termografiche sono state impiegate come dato di calibrazione per la correzione della matrice di temperature apparenti rilevate all'infrarosso.

⁹ Roccia a reggi-poggio, in contropendenza da sud verso nord.

¹⁰ *Carpinus betulus*.



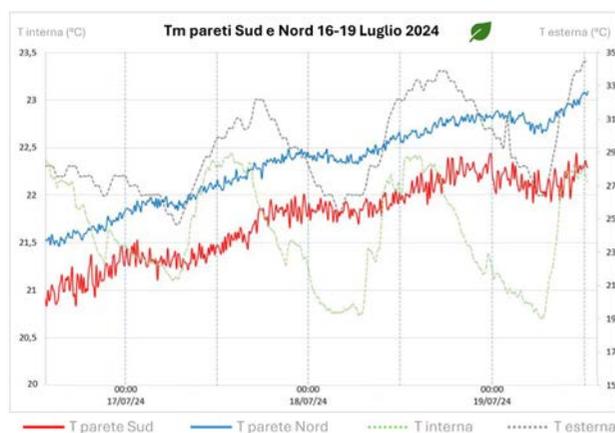
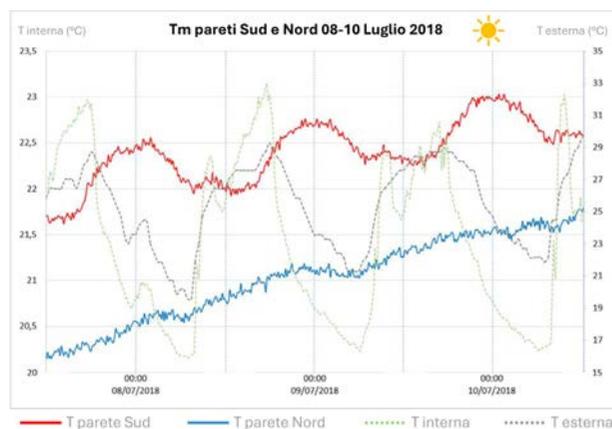


Fig. 6
Cappella di Sant'Eldrado.
Parete sud senza e con
sistema di schermatura.
Grafici delle temperature
di parete interne (foto
LabDIA, 2018, 2024).

Sviluppi futuri

Fino a questo momento il progetto si è focalizzato sugli effetti della trasmissione del calore nella massa muraria, valutando la variazione nel tempo della temperatura media superficiale di aree campione selezionate sulla parete interna affrescata. Il passo successivo consiste nella tracciatura delle mappe delle eventuali anomalie termiche riscontrate sulla superficie dipinta, seguita dall'analisi della loro distribuzione nello spazio e della variazione nel tempo. I primi esiti mostrano una certa ripetibilità dell'evidenza temporale delle alterazioni termiche all'interno della sequenza scansionata. Nelle acquisizioni estive (luglio 2023 e 2024), le mappe delle anomalie sono risultate comparabili. Al contrario, le discontinuità termiche rilevate nel periodo autunnale (ottobre 2023 e 2024) non mostrano corrispondenze tra le due annualità di rilievo. Pur riconoscendo anche in questo caso la ciclicità della comparsa delle anomalie, queste non sembrano localizzarsi nelle medesime aree e appaiono particolarmente influenzate dalle condizioni microclimatiche interne (Figura 7). Il segnale dovrà ora essere correlato allo stato della muratura per verificare, con il supporto dei restauratori, l'eventuale relazione oggettiva tra le alterazioni termiche, i materiali, le tecniche di ripristino e la presenza di fenomeni di degrado sulla superficie.

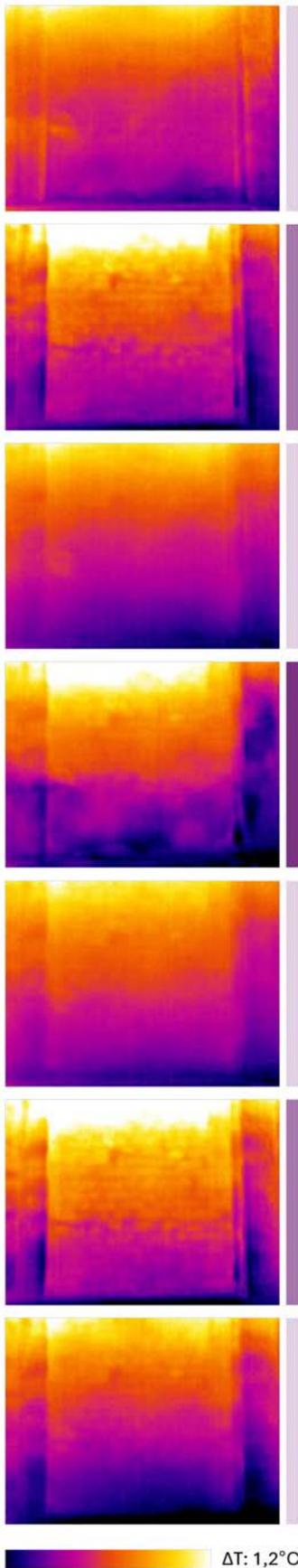
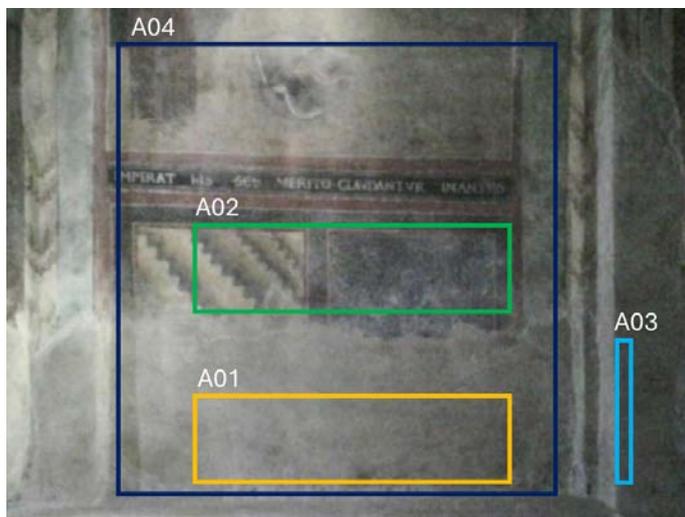
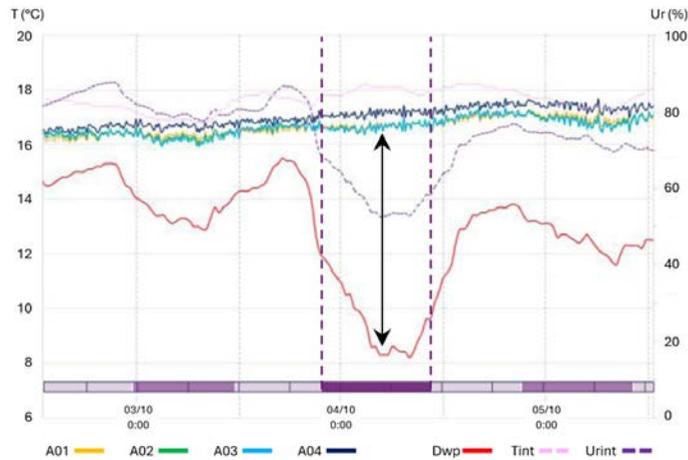


Fig. 7
Cappella di Sant'Eldrado. Parete sud. Analisi IR 2-5 ottobre 2023.

- a) Rilievo termografico. Anomalie cicliche comparse in 72 ore di scansione;
- b) Mappa riassuntiva delle principali anomalie termiche riscontrate nelle 72 ore;
- c) Andamento delle temperature medie di superficie calcolate su aree campione comparate con la curva di dew-point;
- d) Visibile della superficie analizzata con indicazione delle aree campione.



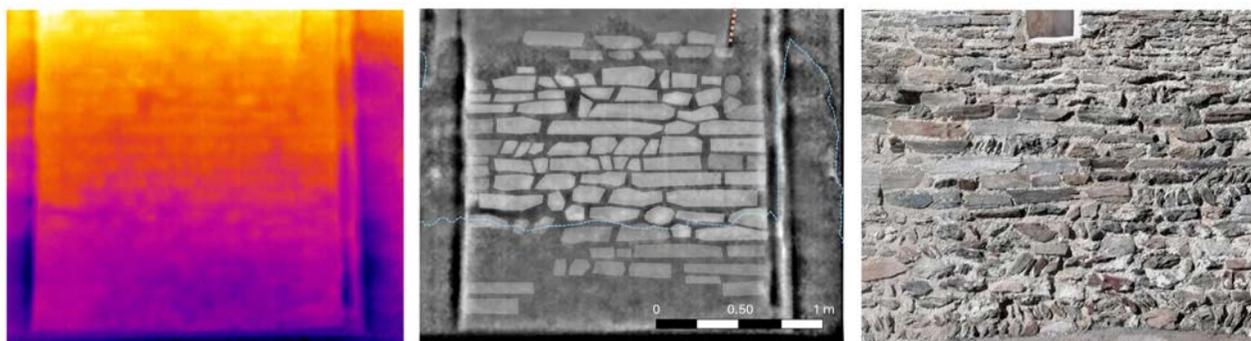


Fig. 8
Cappella di
Sant'Eldrado. Parete sud.
Individuazione all'IR
della tessitura muraria
sulla parete interna.

L'analisi delle sequenze termografiche acquisite ha inoltre consentito di individuare, a seconda delle condizioni ambientali al contorno, in modalità del tutto passiva e tramite elaborazioni matematiche del segnale, la traccia IR delle tessiture murarie al di sotto della finitura dipinta. La fase successiva prevede il confronto tra le tessiture dedotte all'interno e quelle visibili all'esterno, finalizzato al riconoscimento dei piani di giacitura e dell'eventuale presenza di conci passanti, con l'obiettivo ultimo di confermare le ipotesi di continuità della sezione muraria emerse dalla fase termografica (Figura 8).

A conclusione della ricerca svolta, risulta fondamentale pianificare il monitoraggio degli effetti del degrado che potrebbero manifestarsi sulla superficie pittorica in seguito alla modifica delle condizioni termiche della parete, garantendo in tal modo un'azione preventiva e un intervento mirato in caso di necessità.

Considerazioni finali

L'ampia mole di dati acquisiti in un periodo straordinariamente lungo ha evidenziato l'importanza di un approccio integrato, che unisce il monitoraggio termografico e i rilievi ambientali, sia a livello microclimatico che meteorologico, per una comprensione più approfondita dei processi di degrado di un bene culturale. L'analisi IR, se considerata singolarmente, non sarebbe stata in grado di fornire informazioni del tutto esaustive in quanto avrebbe rivelato solo alcune informazioni, senza considerare i fattori ambientali al contorno. Sebbene non sia stato possibile ottenere un riscontro inequivocabile sull'origine del degrado, l'integrazione delle diverse tecniche di monitoraggio ha permesso di escludere alcune ipotesi e di individuarne altre. Nello specifico l'identificazione di soluzioni alternative non volte all'eliminazione della causa, ma alla mitigazione dei suoi effetti, ha consentito di attuare strategie per la conservazione del bene, i cui risultati, grazie all'impiego di tecniche non distruttive, possono essere monitorati nel tempo per valutarne l'efficacia e individuare eventuali criticità prima che diventino irreversibili.

La vasta quantità di dati acquisiti ha altresì consentito la formulazione di un protocollo di conoscenza applicabile su un intervallo temporale significativamente più breve rispetto a quello sperimentato. Tuttavia, è importante sottolineare che questo intervallo non può essere eccessivamente ridotto, poiché il monitoraggio è un processo che deve svilupparsi nel tempo.

Va inoltre considerato che condurre attività scientifiche su un bene destinato alla fruizione pubblica comporta diverse difficoltà. La programmazione delle indagini deve essere estremamente flessibile, adattandosi alle esigenze della struttura e alle variabili meteorologiche, che possono causare interruzioni nella sequenza temporale delle prove.

In alcuni casi, tali interruzioni potrebbero risultare impossibili da recuperare, generando così lacune nella continuità dei dati da analizzare.

Un altro fattore determinante per il buon esito del progetto è stata la sinergia tra le varie professionalità coinvolte. I restauratori hanno sollevato problematiche e monitorato i fenomeni di degrado intervenendo dove necessario. Gli specialisti in diagnostica non distruttiva hanno stimolato riflessioni e sollevato l'attenzione su criticità non ancora percepibili ad occhio nudo. A queste competenze si aggiungono quelle nel campo dello studio dei materiali e della conoscenza del sottosuolo, nonché il ruolo di chi vive quotidianamente il bene e lo conosce sotto il profilo dell'uso, e quello di chi è proprietario, con il compito di garantirne la conservazione. Tutto ciò sotto la supervisione della Soprintendenza, che ha dimostrato grande attenzione nell'accogliere i suggerimenti derivanti dall'impiego di tecniche innovative.

Bibliografia

- P. BISON ET AL. 2024, *Ermanno Grinzato and the humidity assessment in porous building materials: retrospective and new achievements*, in «Quantitative InfraRed Thermography Journal», vol. 21, Issue 6, London, Taylor & Francis, pp. 384-407.
- BLANDINO C. 1973, *L'abbazia benedettina di S. Pietro della Novalesa*, in «Segusium», vol. X, n. 10, pp. 49-74.
- CADELANO G. ET AL. 2014, *Moisture monitoring of historical frescoes by timed infrared thermography*, in ART'14, 11th international conference on non-destructive investigation and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage, Madrid, 11-13 giugno 2014.
- CERRI M.G. (a cura di) 2004, *Novalesa: nuove luci dall'Abbazia*, Electa, Milano.
- CAPUA M.C., CARBOTTA E., MORRATTI V. 2016, *La Cappella di Sant'Eldrado a Novalesa (TO): Riflessione critica e uso di materiali innovativi per la restituzione estetica*, in G. Driussi G., Biscontin G. (a cura di), *Eresia e Ortodossia nel restauro. Progetti e realizzazioni*, Atti Convegno Scienza e Beni Culturali, Bressanone, 28 giugno-1 luglio 2016, Arcadia ricerche, Venezia, pp. 246-253.
- CAPUA M.C. ET AL. 2023, *The frescoes of the Novalesa abbey complex, from restoration to preventive conservation through non-destructive diagnostics*, in Volinia M., Tamburrino A. (a cura di), *14th International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage*, Proceedings of AIPnD ART'23, Brescia, 28-30 novembre 2023, WriteUp Books, Roma, pp. 227-232.
- FRATIANNI S., CAGNAZZI B., CREMONINI R. 2007, *Il Vento in Piemonte*, in A. Biancotti, S. Bovo (a cura di), *Collana Studi Climatologici in Piemonte*, vol. 5, ARPA Piemonte, Pinerolo.
- LANFRANCO I. 2013, *Dalle immagini ai modelli tridimensionali: i principi della fotomodellazione architettonica e la loro integrazione con la termografia all'infrarosso*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, rel. M. Roggero, M. Volinia, non pubblicato.
- MICHELETTO E. 1982, *Le cappelle dell'Abbazia della Novalesa. Architettura e schema distributivo*, in *Atti del V Convegno Nazionale di Archeologia Cristiana*, Novara, 22-29 settembre 1979, Viella editrice, Roma, pp. 103-113.
- SAVI S. 1973, *Architettura preromanica e romanica a Novalesa*, in «Segusium», vol. X, n. 10, pp. 81-103.
- SEGRE MONTEL C. 1964, *Gli affreschi della cappella di S. Eldrado alla Novalesa*, in «Bollettino d'arte», vol. 49, Ministero della Pubblica Istruzione, Roma, pp. 21-40.
- VOLINIA M., GIOTTO M. 2023, *Non-destructive monitoring as a methodological approach for the conservation of cultural heritage: 10 years of studies on the Chapel of Sant'Eldrado*, in Volinia M., Tamburrino A. (a cura di) *14th International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage*, Proceedings of AIPnD ART'23, Brescia, 28-30 novembre 2023, WriteUp Books, Roma, pp. 271-276.
- VOLPI B. 2014, *Nuove acquisizioni intorno ai problemi di conservazione della cappella di S. Eldrado a Novalesa: storia dei restauri e monitoraggio ambientale*, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, rel. M. Naretto, M. Volinia, non pubblicato.

Tra passato e futuro: studi e ricerche mediante diagnostica non invasiva sulla collezione del Museo Archeologico Nazionale di Firenze

Giulia Basilissi

giulia.basilissi@cultura.gov.it

Daniele F. Maras

danielefederico.maras@cultura.gov.it

Museo Archeologico Nazionale di Firenze

pagina a fronte

Fig. 1

Bassorilievo della dea Maat durante le misurazioni FT-IR eseguite dal CNR-IFAC. Tomba di Sethi I (XIX dinastia, 1290-1279 a.C.).

Abstract

The goal of the present paper is to illustrate the large number of diagnostic activities carried out in the last years in regard to the collection of the National Archaeological Museum of Florence, presented in the theoretical framework of conservation of the intangible cultural values attached to tangible heritage. The authors present a survey of the main research projects currently ongoing in collaboration with Italian and international research institutes, which involve non-invasive analytic methods. In particular, recent studies have focused especially on polychrome artifacts, as well as on neutron activation analyses of bronze artifacts.

Key-words

Non-Invasive diagnostics, Conservation, Archaeological museum, Cultural heritage research, (In)tangible cultural heritage.

Ieri come oggi, l'attività del Museo nella trasmissione dei valori culturali¹

La lunga storia del Museo Archeologico Nazionale di Firenze si intreccia sin dall'inizio con quella dell'identità nazionale dell'Italia unita. Infatti, l'esposizione permanente venne istituita nel 1870 per volontà di Vittorio Emanuele II² e il Museo venne inaugurato esattamente un anno dopo, il 12 marzo 1871, nel Cenacolo del Fuligno in via Faenza, accanto al Museo Egizio, che era stato già allestito nella stessa sede già nel 1855 (Romualdi, 2000; Lo Schiavo, 2009; Arbeid, 2022; Noferi, 2023). Il Museo nasceva quindi da un ambizioso programma di riqualificazione culturale della nuova capitale d'Italia, spostata da Torino a Firenze sin dal 1865 (Della Giovampaola, 2015). Di conseguenza, si tratta sin dall'origine di un museo con vocazione nazionale paragonabile a quelli delle principali capitali europee, articolato in più sezioni con particolare riguardo alle civiltà egizia, etrusca e romana e al collezionismo granducale.

Dopo il trasferimento della capitale a Roma, occorre attendere il 1880 perché il museo fiorentino venisse trasferito nella sede attuale presso il Palazzo della Crocetta, che dal 1883 accolse

¹ Il primo paragrafo è scritto da Daniele F. Maras, mentre il secondo e il terzo sono scritti da Giulia Basilissi.

² Regio Decreto del 17 marzo 1870.



ALPHA II



pagina a fronte

Fig. 2
Laboratorio di restauro
interno al Museo nel
1969 (courtesy Archivio
fotografico del Museo
Archeologico Nazionale
di Firenze).

anche la collezione egizia (Consonni, 2024) e poi, per ampia parte del Novecento, fu sede della Soprintendenza archeologica che arricchì le collezioni museali con nuove scoperte e acquisizioni (Arbeid et al., 2020).

Il Museo è pertanto il primo museo “nazionale” appositamente concepito per raccontare attraverso l’archeologia l’identità culturale italiana, e tutt’ora rimane uno dei maggiori musei archeologici d’Italia: di fatto il più grande a nord di Roma (Iozzo, Luberto, 2018, p. 7). Nel corso della sua lunga storia il Museo è stato un punto di riferimento per l’archeologia italiana nei suoi diversi aspetti, come luogo privilegiato di esposizione e divulgazione delle nuove scoperte e acquisizioni dal territorio della Toscana, come centro nevralgico della tutela – in quanto sede della Soprintendenza, nelle sue varie declinazioni fino alla riforma del 2016 – e anche come centro di ricerca per la conservazione del patrimonio archeologico, con particolare riguardo alle attività di prevenzione, manutenzione e restauro.

Oggi, con l’autonomia speciale di cui è stato dotato a partire dal 2024³, il Museo raccoglie la sfida di mantenere il proprio ruolo centrale di riferimento culturale e scientifico anche all’interno della nuova compartimentazione del Ministero della Cultura e degli attuali equilibri dell’amministrazione pubblica.

Da questo punto di vista, la chiave è la rete di contatti e collaborazioni che ruota intorno al Museo nella sua funzione di polo culturale (un *hub* con un anglicismo tecnico, forse spesso abusato). Tale rete è infatti l’unico strumento in grado di procurare e gestire le risorse disponibili sul territorio ed essa stessa una risorsa efficace da curare e arricchire costantemente. Per quanto riguarda la conservazione e il restauro, nonché le tecniche analitiche e di diagnostica ad essi correlate, il Museo è inserito in una serie di progetti di ricerca in corso con istituti di ricerca nazionali e internazionali, spesso facenti capo a università e connessi con progetti di rilevante interesse nazionale (PRIN) o a finanziamenti europei. Alcuni di questi progetti hanno lo scopo precipuo di applicare nuove tecnologie e metodiche diagnostiche, con l’uso di strumenti avanzati e innovativi, che altrimenti non potrebbero essere nelle disponibilità del Museo.

Inoltre, grazie a sponsorizzazioni tecniche e a fondi privati, a volte mediati da fondazioni culturali internazionali, sono in corso o programmati nel prossimo futuro interventi straordinari di conservazione in cui la diagnostica, tanto invasiva quanto non invasiva, è cruciale ai fini conoscitivi sia prima (per determinare le modalità di intervento), sia dopo (per valutarne l’efficacia e programmare la successiva manutenzione). In altre occasioni, invece, sono le richieste di prestiti di singole opere o di intere sezioni delle collezioni del Museo ad offrire l’opportunità per interventi straordinari, immediatamente funzionali ai fini espositivi o, in determinati casi, concordati a compensazione del temporaneo depauperamento dell’esposizione permanente in occasione di eventi esterni. In questi casi, di regola, gli oneri connessi alle attività (ivi comprese diagnostica e progettazione) sono a carico dell’istituzione che richiede il prestito, con una casistica complessa che comprende enti pubblici e privati, sia italiani che internazionali. Infine, nell’ambito della normale attività di conservazione delle collezioni Museali, il personale specialistico interno utilizza regolarmente il laboratorio di restauro con la strumentazione disponibile per interventi mirati, spesso con il supporto di tirocinanti provenienti da istituti di formazione universitaria o di collaboratori professionali a progetto.

Come si è accennato, questa rete di contatti e collaborazioni (un *network*, con un altro anglicismo caro a giornalisti ed economisti) è di per sé una risorsa fondamentale, che consente di sopperire alle eventuali carenze di risorse finanziarie dirette, integrando in modo sostanziale le altre importanti risorse a disposizione del Museo: prime fra tutte le risorse umane, costituite dal personale specialistico (funzionari restauratori e archeologi e assistenti), ma anche le risorse strumentali, fra le quali spicca il nuovo laboratorio di restauro attrezzato (di cui si parlerà me-

³D.P.C.M. n. 57 del 15-3-2024.



glio più avanti), e soprattutto l'impressionante patrimonio culturale costituito dalle collezioni museali, che è allo stesso tempo l'indispensabile oggetto delle attività di ricerca e la ragione stessa dell'esistenza e della funzione del Museo.

Il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio⁴, dispone all'articolo 29 che gli istituti responsabili assicurino la conservazione del patrimonio culturale "mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro". Poco più avanti, la definizione di restauro è stabilita come "l'intervento diretto sul bene attraverso un complesso di operazioni finalizzate all'integrità materiale ed al recupero del bene medesimo, alla protezione ed alla trasmissione dei suoi valori culturali".

⁴ D.Lgs. 42/2004 e ss.mm.ii.

pagina a fronte

Fig. 3

Il nuovo laboratorio di restauro del Museo Archeologico Nazionale di Firenze. Nella foto alcune delle opere oggetto di attività di restauro. Sul fondo il rilievo della dea Maat proveniente dalla Tomba di Sethi I nella Valle dei Re, in primo piano una testa in terra cruda proveniente da Deir el-Medina (XX dinastia del Nuovo Regno, oggetto di un tirocinio e di una tesi di Sofia Bovo studentessa dell'Haute École Arc di Neuchâtel) infine l'Ercole in terracotta da Sinalunga (II sec a.C.).

Ciò comporta in primo luogo che il Museo è tenuto a mettere in campo tutte le risorse a propria disposizione per programmare e garantire la sequenza di attività coordinate funzionali alla conservazione, ivi comprese le sue componenti intangibili, che sono entrate nella riflessione alla base delle convenzioni internazionali sulla conservazione sin dalla Carta di Burra del 1979 e vieppiù dopo la Convenzione Unesco per la salvaguarda del patrimonio culturale immateriale, firmata a Parigi nel 2003 (Fiorani, 2014).

A tale proposito, è fondamentale osservare che per la legge italiana, che regola l'azione dei musei statali, lo scopo di queste attività, sublimato nell'operazione di restauro, è definito dalla "protezione e trasmissione dei valori culturali", che consegue al recupero del patrimonio culturale.

La conservazione prende le mosse dallo studio e dalla ricerca interdisciplinare, che comprende anche ogni operazione conoscitiva e diagnostica, con l'utilizzo delle tecnologie disponibili. Da queste analisi e ricerche derivano complesse informazioni sul contesto di produzione, sulla storia dell'oggetto e sulle capacità tecniche e il know-how impiegati nel passato per produrre, utilizzare e conservarlo fino ai giorni nostri.

Tutte queste informazioni – e altre che diverranno eventualmente disponibili in futuro con il progredire della tecnologia – entrano a far parte di quella "componente immateriale" del patrimonio materiale che chiamiamo interesse o valore culturale e che è oggetto di tutela e valorizzazione in base alle disposizioni di legge (Severini, 2015).

Infatti, la Convenzione Unesco del 2003, offre una definizione ampia di tale patrimonio, che include "the practices, representations, expressions, knowledge, skills – as well as the instruments, objects, artefacts and cultural spaces associated therewith" (Alivizatou, 2012, p. 31). Se ne deduce, pertanto, che il recupero della conoscenza di pratiche, espressioni e competenze del passato per il tramite dello studio analitico degli strumenti, oggetti, artefatti e spazi culturali consente di attingere a una componente immateriale altrimenti perduta del patrimonio culturale (Maras, in stampa).

Questa prospettiva ermeneutica conferisce una profondità storica più ampia e per certi versi inattesa nell'approccio al patrimonio culturale, sia materiale che immateriale, e apre la strada a una serie di importanti risvolti teorici, specialmente nell'ambito giuridico (Piazzai, 2025) e in quello della conservazione (Fiorani, 2014).

In questo senso, si può dire che gli approfondimenti conoscitivi garantiti dalle metodologie diagnostiche al patrimonio culturale, sia quantitative che analitiche, contribuiscano ad arricchirlo in modo sostanziale, grazie all'acquisizione di ulteriori componenti immateriali. Ad esempio, come viene evidenziato nelle pagine che seguono, il recupero delle policromie consente di acquisire informazioni su aspetti di gusto e simbologia e allo stesso tempo sulle tecniche di produzione e impiego dei pigmenti; l'analisi della composizione elementare e molecolare dei metalli e delle loro patine permette di ricostruire la storia nascosta di alcune opere, dalle modalità della loro produzione alla riscoperta e alla conservazione nel corso dei secoli; lo studio analitico delle materie impiegate nel passato sia per produrre e decorare gli originali, sia successivamente per ripararli, integrarne le lacune e garantirne la presentazione espositiva, offre spunti di conoscenza innovativi e spesso inattesi, che integrano la biografia dell'opera e la sua percezione contemporanea.

In questo modo, tramite l'uso di metodi e tecnologie diagnostiche sempre più avanzate, integrate con approcci di studio sia tradizionali che innovativi, è possibile garantire la conservazione dei beni che costituiscono il patrimonio culturale e anche trasmettere alle generazioni future i valori culturali a essi associati, non solo integri, ma addirittura accresciuti e arricchiti (Casiello, 2020; Napoleone, 2020).





Fig. 4
Mummia di coccodrillo
(inv. 2649) della
collezione del Museo
Archeologico Nazionale
di Firenze. Radiografia
del manufatto eseguita
nel 1974 (courtesy
Archivio fotografico del
Museo Archeologico
Nazionale di Firenze).

La collezione del Museo tra restauro e diagnostica: una lunga storia

Come si è accennato la formazione del Museo Archeologico Nazionale di Firenze (MAF) si colloca all'interno di un fenomeno più ampio e di portata europea e cioè la nascita dei musei come istituzioni statali legate alla costituzione delle moderne nazioni. Nel quadro di un programma più ampio di riordinamento dei musei della città Firenze, avvenuto mediante lo smembramento delle collezioni della Galleria degli Uffizi, il Museo fu destinato ad accogliere le antichità greche, etrusche e romane delle collezioni medicee e lorenesi, cui vennero presto associate le collezioni del Museo Egizio, secondo in Italia solo a quello di Torino (Iozzo, 2019).

Questa breve introduzione storica è funzionale a comprendere la varietà dei materiali costitutivi della collezione del Museo, che spazia dai bronzi ai materiali organici, oltre a evidenziare le molteplici vicende conservative. Alcuni dei manufatti hanno un'antica storia collezionistica mentre altri, quando il Museo raccoglieva anche i beni ritrovati sul territorio, provengono direttamente da scavo.

Già dalla sua formazione il Museo ha avuto tra le sue principali attività quelle del restauro e della ricerca, certamente innescate dalla necessità di conservare i nuovi reperti che entravano a far parte delle sue collezioni. Nell'archivio storico del MAF sono conservati numerosi documenti relativi a restauri e ricerche scientifiche come quelle correlate alla pulitura elettrolitica dei metalli, operazione sulla quale fin da subito sembrano concentrarsi le attività del Museo. Già nel 1911 Luigi Adriano Milani (1854-1914), primo direttore del Museo, parla infatti della presenza nel suo istituto di un impianto di 4 o 9 Volts per eseguire prove di pulitura elettrolitica (Baruffetti, 2023, p. 20). Centrale per questa meto-



dologia di pulitura sarà poi la figura di Francesco Rocchi (1882-1929) che entrò come restauratore al Museo Archeologico di Firenze nel 1909 e che per gli sviluppi apportati a questa tecnica è stato definito il “pioniere dell’elettrolisi in Italia” (Micheli, 2015, p. 381). Sarà poi Vittorio Bramanti (1909-1993) a portare avanti questa metodologia anche su manufatti del Museo come evidenzia l’acquisto di cianuro di potassio (previsto dal metodo Finkener) da parte di Antonio Minto (1880-1954), allora direttore del Museo Archeologico⁵.

Alcuni dei profili dei restauratori che operarono al Museo sono ben noti come quello di Pietro Zei (1858/59-1958) (Paribeni, Patera, 2014) il restauratore del Vaso François o quello del già citato Francesco Rocchi, mentre altri emersi dalle ricerche d’archivio, andrebbero ancora studiati e approfonditi.

Una fondamentale stagione per il restauro dei manufatti archeologici e il suo sviluppo tecnico e metodologico è riconducibile alla nascita del Centro di Restauro Archeologico della Toscana in seguito agli accadimenti dell’alluvione del 1966. Il Centro fu inaugurato, lo stesso anno, nel medesimo edificio del Museo Archeologico Nazionale di Firenze, nella parte della struttura prospiciente piazza della Santissima Annunziata. In una foto del 1969, conservata presso l’Archivio Fotografico del MAF, è possibile vedere il laboratorio con al suo interno alcuni restauratori al lavoro su manufatti ceramici (Figura 2). Nel 1974 il laboratorio fu spostato in via del Palazzo Bruciato, poi nel 1992 in via Manni e infine nell’ultima sede di Largo del Boschetto, dove verrà purtroppo dismesso nel 2019 (Lo Schiavo et al., 2010; Pallecchi, Anastasio, 2021). Tuttavia nel 2024 sono stati eseguiti lavori per la realizzazione del nuovo laboratorio di restauro interno al Museo, anche grazie ad alcuni fondi conferiti mediante il Bando aiuti finanziari per il restauro di beni culturali mobili del Consiglio Federale svizzero⁶. Questo nuovo spazio adibito alle

Fig. 5
Urna del Bottarone (fine V-Inizio IV secolo a.C.), Museo Archeologico Nazionale di Firenze (foto di Ottaviano Caruso; courtesy Museo Archeologico Nazionale di Firenze).

⁵ ARCHIVIO DEL MUSEO ARCHEOLOGICO NAZIONALE DI FIRENZE, 1925-1950, posizione 7, b.15, n. 247. La ricerca dettagliata ed esaustiva della documentazione relativa ad attività di diagnostica e restauro resta ancora in larga parte da fare, per cui occorre segnalare che allo stato attuale non si dispone di una mappatura dei documenti disponibili, al momento suddivisi tra faldoni e fascicoli relativi ad annate e tematiche disparate.

⁶ Cfr. *infra*, nota 8.

attività di restauro permetterà le operazioni conservative, lo studio e la ricerca sulla collezione del Museo (Figura 3). Sarà inoltre possibile ospitare attività formative come i tirocini oltre ai restauratori di ditte private incaricati di attività conservative, così da poter attuare al meglio la supervisione dei restauri ma soprattutto attivare prolifici scambi tra professionisti.

Il laboratorio di restauro è intitolato a Erminia Caudana (1896-1974), una delle prime restauratrici italiane specializzata in supporti cartacei e membranacei. Nel 1935 venne chiamata a Firenze da Giuseppe Botti (1889-1968), allora curatore della sezione egizia, con l'incarico di restaurare numerosi papiri provenienti da corredi funebri individuati nelle campagne di scavo del 1828 e 1829 a Tebtynis (Boffula Alimeni, 2020). La collaborazione con Firenze si protrarrà fino al 1951 e nell'Archivio Storico del Museo si conservano vari documenti relativi alle strumentazioni e ai materiali impiegati per i suoi interventi.

Come è noto, lo studio diagnostico di un'opera è una delle fasi più importanti per la caratterizzazione dei materiali costitutivi, di degrado e di restauro ed è propedeutica e funzionale alle attività conservative.

Il Centro di Restauro Archeologico della Toscana, oltre agli importanti restauri che possiamo ancora oggi ammirare nelle collezioni dei più importanti musei italiani e esteri, ha prodotto un'ampia documentazione fotografica, relazioni di restauro, disegni ma anche numerose radiografie delle quali circa 3300 sono conservate presso gli archivi oggi di competenza della Soprintendenza per la città metropolitana di Firenze e le provincie di Prato e Pistoia. Il Centro di Restauro aveva infatti un laboratorio interno di indagini radiografiche e vennero eseguite numerose campagne diagnostiche, principalmente sui bronzi e sulla collezione delle mummie umane e animali della sezione egizia del Museo (Figura 4).

Un decennio di collaborazione tra istituzioni

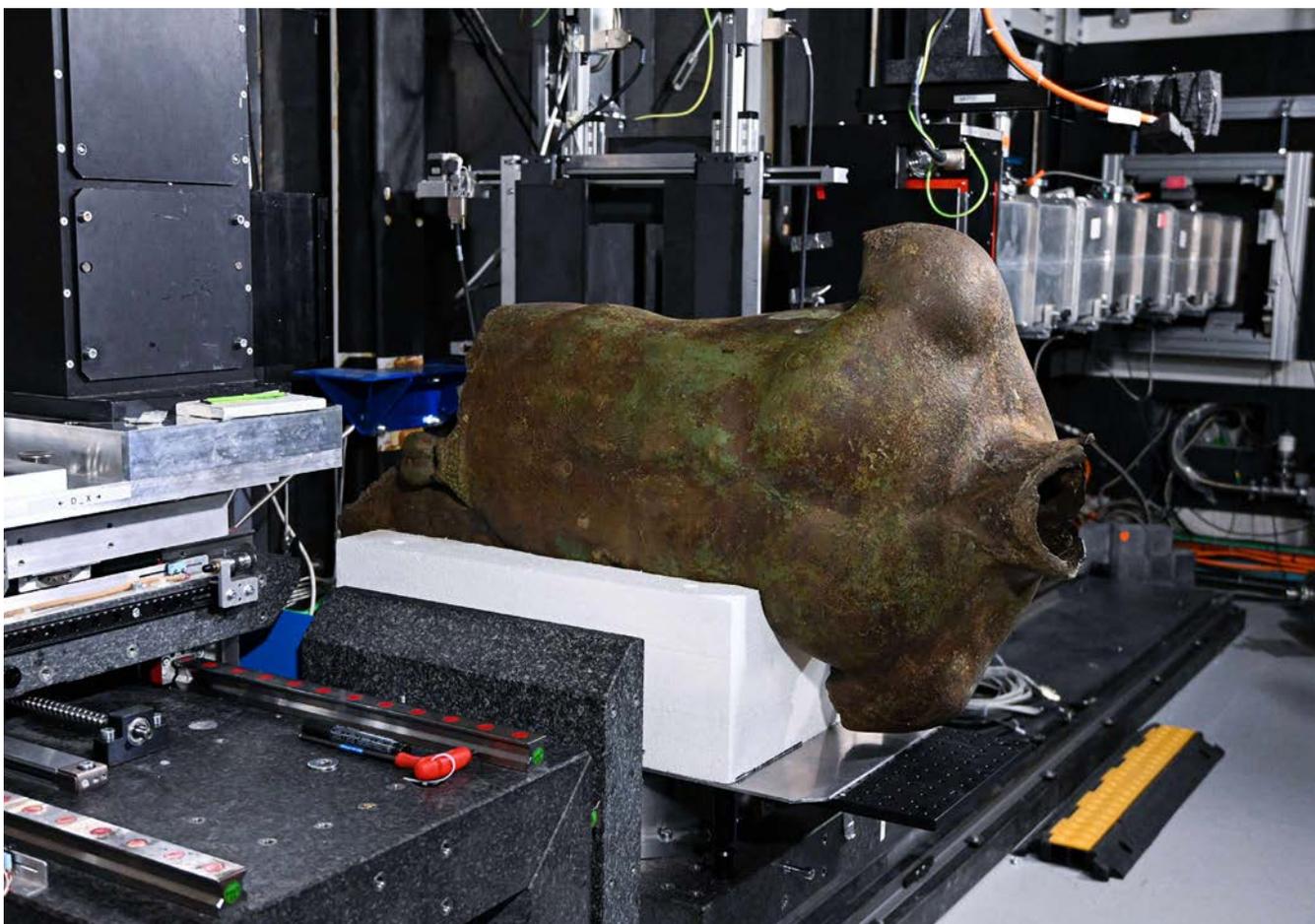
Negli anni numerosi sono stati i progetti di studio e ricerca che il Museo Archeologico Nazionale di Firenze ha attivato con enti di ricerca e università. Non è possibile illustrare in questa sede tutti i lavori condotti, ma di seguito vengono riportati alcuni progetti presentati in tempi relativamente recenti presso convegni italiani ed esteri.

Tra il 2014 e il 2018 sono state condotte varie campagne diagnostiche sui sarcofagi in terracotta e materiale lapideo provenienti da Toscana a cura dell'allora ICVC⁷ del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), oggi Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale (CNR-ISPC), per indagare i lacerti di policromia ancora conservati. Il gruppo di ricerca con il supporto di Claudia Noferi, una delle curatrici della sezione etrusca del Museo, ha presentato il lavoro con un poster alla *International Round Table on Polychromy in Ancient Sculpture and Architecture* del 2018 presso il British Museum.

Importanti risultati sono stati raccolti anche su una scultura recentemente entrata a far parte della collezione del Museo. Si tratta della Testa Lorenzini, un importante esempio di scultura etrusca in marmo, acquisita dal Ministero della Cultura mediante prelazione nel 2019 e entrata nelle collezioni del MAF. Le indagini sono state condotte dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (DST-UniFi), dall'Istituto di Fisica Applicata Nello Carrara (CNR-IFAC) e dal CNR-ISPC, entrambi istituti del Consiglio Nazionale delle Ricerche, con l'intento di caratterizzare la policromia ancora conservata e il materiale lapideo, arrivando così a definire la provenienza del marmo dalle Alpi Apuane. Data l'importanza dei dati raccolti questi sono stati presentati con un poster al convegno annuale dell'Associazione Italiana di Archeometria (AIAR) del 2021.

L'intervento di restauro di maggiore rilievo condotto recentemente all'interno del Museo Archeologico Nazionale di Firenze è quello sull'urna cineraria bisoma del Bottarone (Figura 5). Questo manufatto in alabastro gessoso presenta ancora oggi una policromia straordi-

⁷ Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali. Gruppo di ricerca: Susanna Bracci, Giovanni Bartolozzi, Roberta Iannaccone, Sara Lenzi e Donata Magrini.



nariamente conservata nonostante questa, trovandosi esposta nella sezione Topografica al piano terra del Museo, sia stata colpita dall'onda di piena alluvionale del 1966. Così come per molte altre opere della collezione venne prontamente eseguito il restauro, grazie proprio alla creazione del Centro di Restauro. Venne operato un intervento attento e calibrato, descritto nel volume *Restauri archeologici* della Soprintendenza alle Antichità d'Etruria pubblicato nel 1969, per la mostra di presentazione dei restauri. In quell'occasione vennero eseguite anche indagini diagnostiche, alcune atte addirittura a comprendere la salubrità dell'intervento per gli operatori andando a identificare le colonie di batteri gram positivo e gram negativi e bacterium Coli (*Restauri Archeologici* 1969). Nella pubblicazione si fa riferimento, inoltre, all'esecuzione di indagini nello spettro dell'infrarosso e degli ultravioletti proprio per lo studio della policromia, offrendo quindi un importante supporto scientifico ai restauratori. A distanza di oltre 50 anni, il monumento necessitava di un nuovo intervento conservativo a causa dell'imbrunimento di alcuni protettivi. Il progetto di studio e restauro è stato proposto da Barbara Arbeid, curatrice della sezione etrusca, dalla scrivente e da Mario Iozzo, allora direttore del Museo, per il Bando aiuti finanziari per il restauro di beni culturali mobili – accordo tra il Governo della Repubblica italiana e il Consiglio Federale svizzero⁸ – risultando uno dei vincitori per l'anno 2022. Il finanziamento ottenuto ha permesso il restauro dell'opera eseguito da Daniela Manna e un'ampia campagna diagnostica a cura di un nutrito gruppo di ricerca costituito da ad ADARTE⁹, il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze¹⁰, Ottaviano Caruso e Marcello Spampinato. Tra

Fig. 6
Torso di Livorno. Indagini presso l'Institute Laue Langevin (ILL) di Grenoble (courtesy Archivio fotografico del Museo Archeologico Nazionale di Firenze).

⁸ <<https://www.bak.admin.ch/bak/it/home/patrimonio-culturale/trasferimento-internazionale-dei-beni-culturali/aiuti-finanziari-patrimonio-culturale-mobile.html>>.

⁹ ADARTE di Azzurra Mecherelli e Francesca Briani.

¹⁰ Gruppo di ricerca: Alba Santo e Sara Calandra.

pagina a fronte

Fig. 7

Sacello in legno policromo – sezione egizia. Indagini iperspettrali per lo studio della policromia eseguite dall'IFAC-CNR (courtesy: Archivio fotografico del Museo Archeologico Nazionale di Firenze).

le indagini condotte di particolare interesse è risultata la luminescenza indotta dalla radiazione visibile (VIL) eseguita sull'urna che hanno permesso di rilevare la presenza di blu egizio, altrimenti non visibile a occhio nudo. I fondi hanno permesso inoltre la realizzazione del laboratorio di restauro e il futuro intervento conservativo su un corredo funerario etrusco ritrovato in località Sperandio (Perugia), costituito da manufatti in bronzo, piombo, avorio e anch'esso danneggiato dall'alluvione del 1966.

Nel 2024 è iniziato il restauro del Torso di Livorno a cura del restauratore Nicola Salvioli grazie al generoso contributo dei Friends of Florence su progetto di Mario Iozzo, allora direttore del Museo. Oltre alla necessità di un intervento conservativo, legato a fenomeni di alterazione della lega di rame e alla presenza di patinature brune dette "patine lorenese", correlate alla storia conservativa dell'opera presso le collezioni Granducali, si è considerato necessario uno studio per la comprensione della lega e delle tecniche di realizzazione. Il bronzo è stato ritenuto un manufatto romano eseguito traendo il calco da un modello greco datato tra il 480 e il 470 a.C., ma negli anni si sono succeduti vari quesiti relativi alla sua fase di realizzazione. Gli studi eseguiti hanno identificato sulla superficie alcuni tasselli, definiti "tasselli fantasma" che attestavano la copia da un bronzo con precedenti difetti di fusione, ma del dato non si era certi a causa delle patine superficiali. Per cercare di individuare alcune possibili risposte ai quesiti ancora aperti è stata programmata una campagna diagnostica che ha previsto, tra le tecniche non invasive, analisi FT-IR¹¹, XRF¹² portatile e Eddy Current per studiare la lega e le sue alterazioni eseguiti dal CNR-ISPC¹³.

Grazie all'impegno del restauratore, del Museo e del CNR-IFAC¹⁴ si è reso possibile effettuare indagini di Tomografia neutronica presso l'Institute Laue Langevin (ILL) di Grenoble (Figura 6). Questa tecnica di caratterizzazione non distruttiva permette lo studio delle lega e della sua struttura cristallina, funzionale all'identificazione del sistema di colaggio della lega, la presenza di canali, sfiati, ecc.

Importanti campagne diagnostiche sono state inoltre eseguite grazie al CNR-IFAC¹⁵ sulla collezione egizia, a partire dal 2022 con la guida di Anna Consonni, curatrice della sezione. Queste hanno interessato il Naos in granito proveniente da Philae pervenuto al Museo in seguito alla missione Franco Toscana in Egitto 1828-1829 e sul quale è stata individuata una policromia e alcuni frammenti di dorature. Di particolare rilievo sono state le indagini condotte su una serie di manufatti in legno policromo, tra cui due sacelli portatili del periodo romano (Figura 7). Qui le indagini hanno evidenziato l'uso del blu egizio in particolari elementi decorativi come i copricapi delle divinità a testa di falco e dei re, a sottolineare un uso simbolico di questo pigmento. Questi lavori di ricerca sono sfociati in due tesi del Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Materiali per la Conservazione e il Restauro dell'Università di Firenze, sottolineando l'importante relazione del Museo con il mondo dell'università e quello del Consiglio Nazionale delle Ricerche¹⁶.

Grazie a un progetto di studio del prof. Luca Cappuccini del Dipartimento di Storia, Archeologia, Geografia, Arte e Spettacolo dell'Università di Firenze in collaborazione con il Museo Archeologico Nazionale di Firenze tra il 2024 e il 2025 si è proceduto a una ricerca sulla due sculture di Casale Marittimo. La campagna diagnostica multidisciplinare messa in campo ha previsto la collaborazione di vari istituti di ricerca dell'Università di Firenze¹⁷ e del CNR. Il gruppo di lavoro del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze ha eseguito indagini in fluorescenza a raggi X (XRF) per lo studio elementare dei materiali inorganici costitutivi dei due manufatti. La strumentazione a disposizione del dipartimento permette di eseguire micromapping di distribuzione elementare che è stata impiegata nell'area degli occhi della scultura B di Casale. I dati raccolti, presentati nel 2025 sulla rivista *Journal of Cultural Heritage* (Santo et al., 2025), risultano di grande interesse e hanno permesso una rilettura di questa scultura dal punto di vis-

¹¹ Spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier.

¹² Fluorescenza a raggi X.

¹³ Gruppo di ricerca di Barbara Salvadori.

¹⁴ Gruppo di ricerca: Francesco Grazzi con il supporto di Francesco Cantini.

¹⁵ Gruppo di ricerca: Marcello Picollo, Costanza Cucci, Giovanni Bartolozzi, Francesco Grazzi e Francesco Cantini.

¹⁶ Tesi magistrale di Teresa Brancolini e di Alessandra Banchelli.

¹⁷ Gruppo di ricerca: Alba Santo e Sara Calandra.

¹⁸ Gruppo di lavoro: Marcello Picollo e Lorenzo Stefani.

¹⁹ Tesi di diploma di Gabriella Simoni. Relatore Coordinatore: Paola Ilaria Mariotti; Relatori: Anna Patera, Gianna Giachi, Pasquino Palleschi, Roberto Bonaiuti. Indagini diagnostiche eseguite dal Laboratorio Scientifico dell'Opificio delle Pietre Dure, il CNR-ISTI e il CNR-INO.



ta tecnologico. Il gruppo del CNR-IFAC¹⁸ ha inoltre eseguito imaging diagnostico mediante luminescenza indotta da radiazione visibile (VIL) e ultravioletto riflesso (UVR). Numerosi e prolifici sono stati i progetti di restauro e diagnostica condotti in collaborazione con l'Opificio delle Pietre Dure. Uno dei più recenti interventi, eseguito nell'ambito di una tesi di laurea del settore restauro Pitture murali e stucchi¹⁹, è quello del timpano dipinto della tomba etrusca dalla Villa Tarantola di Tarquinia, datato al VI sec. a.C.. L'opera, oltre a problemi conservativi della superficie pittorica dovuti alla presenza di materiali non idonei e varie ri-

dipinture, presentava problemi strutturali riconducibili al sistema di contenimento in legno eseguito nel 1904 per il distacco a massello. Sono pertanto state effettuate analisi strutturali dell'opera mediante indagini non invasive come il rilievo 3D, il Georadar, indagini soniche e termiche. Considerata la struttura nel suo insieme, lo studio e la ricerca sperimentale della tesi si sono focalizzati sulla progettazione di un sistema di rinforzo con materiali compositi fibrorinforzati, grazie al supporto del progetto di un ingegnere (Mariotti, Simoni, 2021). Il recupero di quest'opera, oltre ad essere rilevante per gli studiosi e i visitatori, sarà funzionale al suo riallestimento all'interno del nuovo Museo Archeologico di Firenze, il cui progetto è in corso e che interesserà varie aree della struttura museale.

I lavori di ricerca qui esposti e altri, di altrettanto interesse, di cui non è possibile dare contezza in questa sede, sono stati presentati in convegni e pubblicazioni in Italia e all'estero. Il Museo però, oltre ad essere un istituto di ricerca e conservazione, ha tra i suoi compiti quello di «offrire esperienze differenziate per l'educazione, il piacere, la riflessione e la condivisione di conoscenze» così come indicato nella definizione dell'International Council of Museums (ICOM) del 2022. Proprio a questo scopo si è deciso, attraverso vari incontri, di raccontare la ricerca e il restauro in corso al MAF con attività che aprissero il Museo al pubblico, rendendo visibili attività che spesso sono accessibili solo al personale interno. Si è quindi reso visibile il cantiere di restauro dell'urna del Bottarone con visite guidate a cura delle funzionarie del Museo, spiegando l'intervento conservativo ma anche alcuni dei risultati diagnostici. Nella giornata Arte e Scienza il Museo ha presentato, grazie a una collaborazione tra i funzionari del Museo e il CNR-ISPC, la visione mediante microscopio digitale di alcune stesure policrome presenti su una delle teste in terracotta provenienti da Tuscania, spiegando i procedimenti che portano allo studio diagnostico di queste opere.

Quello appena presentato è un breve excursus su alcune delle ricerche svoltesi e ormai concluse, ma numerosi sono gli studio in corso sulla collezione del Museo. È attiva un'importante collaborazione nell'ambito di una ricerca di tesi²⁰ con l'Opificio delle Pietre Dure - settore restauro delle sculture lignee riguardante lo studio di un coperchio di sarcofago policromo della sezione egizia; questa rappresenta una delle prime occasioni di collaborazione tra i due istituti per quanto riguarda questa classe di materiali.

Relativamente a progetti per il futuro della ricerca all'interno del MAF nell'anno corrente il Museo ha potuto accedere al laboratorio mobile MOLAB (E-RIHS) grazie al progetto *SHADES - Seianti's Hues: Analysis, Diagnostics, Engagement, Showcase*. La campagna diagnostica, che si svolgerà nei prossimi mesi, riguarderà il sarcofago in terracotta di Larthia Seianti la cui policromia, straordinariamente conservata, non è mai stata indagata in maniera approfondita e con tecniche moderne.

Le attività di studio presentate in questo breve saggio sono solo una parte delle ricerche in corso. La volontà per il futuro del Museo Archeologico Nazionale di Firenze è quella di continuare nel tempo ad attivare sempre nuove attività di ricerca e restauro, creando collaborazioni con istituti vocati alla medesima funzione e favorendo così lo scambio tra professionisti e ricercatori.

²⁰ Tesi di Riccardo Sabatini. Relatori coordinatori: Claudia Napoli, Giulia Basilissi. Relatori: Anna Consonni, Anna Patera, Alessandra Santagostino Barbone.

Bibliografia

- ALIVIZATOU M. 2012, *Intangible Heritage and the Museum. New Perspectives on Cultural Preservation*, Routledge, New York.
- ARBEID B. 2022, *Per una nuova immagine del Museo Etrusco di Faenza: le fotografie di Vincenzo Paganori*, in *Scritti di archeologia offerti a Mario Iozzo per il suo sessantacinquesimo compleanno*, Edizioni Espera, Roma, pp. 23-38.
- ARBEID B., BUENO M., TARANTINI M. 2020, *Gli archivi della Soprintendenza archeologia della Toscana*, in A. PESSINA, M. TARANTINI (a cura di), *Archivi dell'archeologia italiana*, Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, pp. 107-126.
- BARUFFETTI M. 2023, *Per una storia del restauro dei bronzi a Firenze. Dall'Unità d'Italia ai giorni nostri*, Edifir, Firenze.
- BOFFULA ALIMENI P. 2020, *Il restauro del papiro*, Il Prato, Padova.
- CASIELLO S. 2020, *Riflessioni sulla conservazione e trasmissione del patrimonio dei beni culturali*, in D. ESPOSITO, V. MONTANARI (a cura di), *Realtà dell'architettura fra materia e immagine. Per Giovanni Carbonara: studi e ricerche*, L'Erma di Bretschneider, Roma-Bristol, pp. 75-80.
- CONSONNI A. 2024, *The Egyptian Collection of the Museo Archeologico Nazionale in Florence*, in CH. GRECO (ed.), *Memory is Our Future. 200 Years of the Museo Egizio*, Panini, Modena, pp. 174-181.
- DELLA GIOVAMPAOLA I. 2015, *Steri e sventramenti: l'archeologia nelle capitali sullo scorcio del XIX sec. Il caso di Firenze*, «Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana», 11, pp. 177-194.
- FIORANI D. 2014, *Materiale/Immateriale: frontiere del restauro*, in «Materiali e strutture: problemi di conservazione», nn. 5-6, pp. 9-23.
- IOZZO M., LUBERTO M.R. 2018, *L'arte di donare: nuove acquisizioni del Museo archeologico nazionale di Firenze*, Polistampa, Firenze.
- IOZZO M. 2019, *Il Museo Archeologico Nazionale di Firenze e il suo ruolo nel quadro degli studi etruscologi*, in *Etruschi. Viaggio nelle terre dei Rasna. Catalogo della mostra, Bologna, Museo Civico Archeologico, 7 dicembre 2019 - 24 maggio 2020*, Electa, Milano, pp. 453-459.
- LO SCHIAVO F. 2009, *La Chimera e il suo Museo*, in M. IOZZO (a cura di), *La Chimera di Arezzo*, Polistampa, Firenze, pp. 1-6.
- LO SCHIAVO F., GALLI F., INNOCENTI C. 2010, *Firenze. Centro di Restauro della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana: attività 2010*, «Notiziario della Soprintendenza per i Beni Archeologici della Toscana», n. 6, pp. 202-206.
- MARAS D.F. (in stampa), *Intangible Elements in Material Culture. Writing as a Medium for Cultural Exchange in Archaic Etruria*, in P. Di Giovine (ed.), *Ancient languages and writing systems in contact*, Proceedings of the congress (Rome, 27-28 May 2024), Brill, Leiden.
- MARIOTTI P. I., SIMONI G. 2021, *Il frontone dipinto della tomba Tarantola. Il restauro di una pittura murale etrusca trasportata a massello*, «OPD restauro», n. 23, pp. 165-178.
- MICHELI M. 2015, *Il restauro dei metalli antichi dalla metà del XIX secolo agli anni Sessanta del Novecento*, in «1860-1970 Il restauro archeologico in Italia. Fonti storiche e pratiche disciplinari», Archivio Centrale dello Stato, Roma, pp. 351-404.
- NAPOLEONE L. 2020, *La tutela del patrimonio culturale negli ultimi decenni. Riflessioni e possibili cambiamenti di paradigma*, in D. ESPOSITO, V. MONTANARI (a cura di), *Realtà dell'architettura fra materia e immagine. Per Giovanni Carbonara: studi e ricerche*, L'Erma di Bretschneider, Roma-Bristol, pp. 241-246.
- NOFERI C. 2023, *Materiali vulcenti nel Museo Archeologico Nazionale di Firenze: alcune riflessioni*, «Mélanges de l'École Française de Rome», n. 135.1, pp. 107-115.
- PALLECCHI P., ANASTASIO S. 2021, *La riorganizzazione degli archivi del Centro di Restauro archeologico*, in A. PESSINA, B. Arbeid, M. Tarantini (a cura di), *Tutela & Restauro 2016-2019. Notiziario della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la Città metropolitana di Firenze e le province di Pistoia e Prato*, All'Insegna del Giglio, Sesto Fiorentino, pp. 340-341.
- PARIBENI E., PATERA A. 2014, *Provando e riprovando senti crescere le speranze di rendere a noi l'opera bella*. Note biografiche sul restauratore Pietro Zei, «OPD restauro», n. 26, pp. 354-375.
- PIAZZAI A. 2025, *Il bene culturale immateriale come bene giuridico in senso lato*, in *Aedon*, fasc. 1 <<https://aedon.mulino.it/archivio/2025/1/piazzai.htm>>.
- Restauri Archeologici. Mostra dei restauri sulle opere d'arte del Museo Archeologico di Firenze danneggiate dall'alluvione del 4 novembre 1966*, Soprintendenza alle Antichità d'Etruria, Olschki, Firenze, 1969, pp.115-116.
- ROMUALDI A. 2000, *Il Museo archeologico nazionale di Firenze*, in M. TORELLI (a cura di), *Gli Etruschi. Catalogo della mostra, Venezia, 26 novembre 2000 - 1 luglio 2001*, Electa, Milano, pp. 515-521.
- SANTO A.P., CALANDRA S., CAPPUCCINI L. 2025, *Unveiling hidden details of an etruscan statue: The power of combined pXRF spot and map approach*, «Journal of Cultural Heritage», n. 73, pp. 536-542.
- SEVERINI G. 2015, *L'immateriale economico nei beni culturali*, in *Aedon*, fasc. 3 <<https://aedon.mulino.it/archivio/2015/3/severini.htm>>.

Disseminazione nel contesto internazionale delle prove non distruttive nel settore dell'ingegneria civile e dei beni culturali: la collaborazione tra AIPnD e IAEA

Dario Foppoli

d.foppoli@foppolimoretta.it

Consiglio Scientifico

Associazione Italiana Prove non

Distruttive (AIPnD)

pagina a fronte

Fig. 1
Damasco: il cortile
centrale del Khan di
Azim Pascià (foto D.
Foppoli, 2024).

Abstract

Since 2019, the Italian Association for Non-Destructive Testing has been collaborating with the International Atomic Energy Agency in the sector of development and certification of Non Destructive Testing and during the interventions for recovery after natural and non-natural disasters. In this context Italian experts have had the opportunity to take part to many international technical cooperation missions, at national and regional level, giving training about methods for structural assessment of damaged buildings and on the use of non-destructive testing aimed to analyze the integrity of buildings affected by disasters. These missions have often taken place in complex environmental conditions, due to the geopolitical situation of the areas, like in Beirut or Damascus.

However, in any case, the contribution of Italian technicians has been relevant, particularly with reference to the approach to the buildings classified as cultural heritage. It has to be underlined that our national history and culture eases the knowledge transfer to different geographical contexts, and that Italian skills in this specific sector are relevant, as well as appreciated worldwide.

Key-words

IAEA, NDT, International Technical Cooperation, Cultural heritage.

Introduzione

L'Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica e Laboratori di Prova (AIPnD) è un Ente del Terzo Settore senza scopo di lucro con finalità scientifiche, culturali e professionali. È stata fondata nel maggio 1979 con l'obiettivo di promuovere la conoscenza scientifica e lo sviluppo tecnologico delle prove non distruttive (nel seguito dell'articolo esse verranno identificate con l'acronimo inglese *NDT = Non Destructive Testing*) e di informare e sensibilizzare in merito alla loro applicazione. L'Associazione Italiana riunisce oltre cinquecento istituzioni, centri di ricerca e aziende che operano a livello nazionale utilizzando le tecniche di prova non distruttive nei vari settori (Aerospazio – Automotive – Beni Culturali – Civile – Energia – Ferroviario) e cura la redazione di riviste e pubblicazioni, l'organizzazione di convegni, la divulgazione e la formazione nel settore di competenza.





Fig. 2
Le missioni di IAEA nel contesto
della Cooperazione Tecnica
Internazionale (elaborazione D.
Foppoli, 2025).

Fin dal settembre 2019 AIPnD ha ottenuto un significativo riconoscimento internazionale sottoscrivendo con International Atomic Energy Agency (IAEA) un *practical arrangement* finalizzato alla cooperazione nel campo dello sviluppo e della certificazione dei controlli non distruttivi e all'intervento in caso di disastri naturali e non naturali.

IAEA è un'Agenzia delle Nazioni Unite (UN) costituita nel 1957 in risposta ai timori e alle aspettative generate dalle scoperte e dai diversi usi della tecnologia nucleare. È stata caratterizzata fin dalla sua istituzione dal motto "Atoms for Peace", ricevendo il mandato di operare con i suoi stati membri e con molteplici partner in tutto il mondo per promuovere l'applicazione delle tecnologie nucleari in modo pacifico e sicuro. A riprova dell'impegno profuso per questa missione nel 2005 l'Agenzia e il suo Direttore Generale, Mohamed ElBaradei hanno ricevuto il Premio Nobel per la Pace con la motivazione: «per gli sforzi per impedire che l'energia nucleare venga utilizzata per scopi militari e per garantire che l'energia nucleare venga impiegata per scopi pacifici nel modo più sicuro possibile».

Nell'ambito del suo mandato IAEA ha da sempre svolto un ruolo proattivo nel promuovere l'adozione e l'applicazione di tecniche non distruttive attraverso varie iniziative tra cui progetti di Cooperazione Tecnica (TC) nazionali e regionali (nel lessico UN le regioni hanno dimensione continentale). Il programma di TC costituisce infatti il meccanismo principale destinato a trasferire tecnologia agli stati membri, supportandoli per affrontare le principali priorità di sviluppo in settori quali salute e nutrizione, alimentazione e agricoltura, acqua e ambiente, applicazioni industriali e gestione delle conoscenze nel settore nucleare. Il programma aiuta inoltre gli stati membri a identificare e soddisfare le future esigenze energetiche e contribuisce a migliorare la sicurezza delle radiazioni e la sicurezza nucleare in tutto il mondo, anche attraverso la fornitura di assistenza legislativa.

In risposta ai bisogni espressi dagli stati membri, negli ultimi decenni IAEA ha promosso lo sviluppo delle applicazioni delle prove non distruttive nel campo dell'ingegneria civile (Guidebook, 2002) e dei beni culturali (Gonçalves et al., 2018), in particolare in relazione alle attività di prevenzione e di intervento conseguenti ad eventi catastrofici quali incendi, esplosioni, terremoti e alluvioni (Forensic Insight, 2024). Coordinando numerosi progetti di TC, l'Agenzia ha addestrato il personale addetto all'esecuzione delle prove non distruttive con l'obiettivo di costituire a livello internazionale centri di competenza finalizzati a raggruppare e organizzare tecnici in grado di acquisire i dati necessari per valutare le condizioni strutturali degli edifici e delle infrastrutture civili danneggiati da disastri naturali e non naturali. Nel settore delle prove non distruttive gli stati membri hanno quindi potuto sviluppare programmi di addestramento e di certificazione del personale tecnico addetto all'esecuzione di tali prove. IAEA è stata inoltre coinvolta attivamente e direttamente nella redazione di ricerche (Nuclear Techniques, 2011), materiale per l'addestramento e linee-guida (Guidelines, 2024) utili a sviluppare competenze e conoscenze istituzionali, capitale umano e infrastrutture tecniche.

In molte regioni IAEA ha coordinato lo sviluppo di queste attività specialmente a seguito di eventi catastrofici (Figura 2); con lo scopo di portare aiuto immediato dopo tali disastri; tuttavia gli interventi di emergenza sono stati considerati anche l'occasione per diffondere informazioni e condividere esperienze, competenze e strumentazioni.

Le prove non distruttive costituiscono una parte fondamentale delle procedure da applicare in situazioni di emergenza e nel contempo risultano un potente strumento per la prevenzione dei possibili danni causati da eventi catastrofici (Foppoli, 2016). Un'attenzione particolare deve essere inoltre rivolta all'applicazione a lungo termine dei metodi *NDT* come parte dei programmi di manutenzione necessari per migliorare la sicurezza delle strutture esistenti (ad esempio edifici, ponti e impianti industriali) e come parte delle misure di controllo di qualità per verificare i processi di costruzione di edifici e infrastrutture rendendoli più sicuri.

Vengono nel seguito descritti alcuni interventi realizzati da IAEA con il contributo di AIPnD, che hanno comportato significativi benefici sia nei paesi direttamente coinvolti, che alla più ampia scala regionale.

L'esplosione del 2020 nel porto di Beirut

Il 4 agosto 2020 nel porto di Beirut si è verificata l'esplosione di un deposito di 2750 t di nitrato di ammonio che ha prodotto un cratere di 124 m di diametro e 43 m di profondità e ha causato oltre 200 morti, 7.000 feriti e 300.000 evacuati, provocando danni rilevanti in un raggio di 3 km; gli effetti sono stati risentiti in un raggio di 10 km dal luogo della deflagrazione. Molti edifici direttamente colpiti dall'esplosione, in particolare tra quelli che possono essere considerati Beni Culturali (Hammoud, 2014), sono stati fortemente danneggiati, innescando localmente un dibattito in relazione alla effettiva opportunità e possibilità del loro recupero (El Hage et al. 2023). Per tale motivo è risultato fondamentale diffondere le conoscenze in merito alla possibilità di utilizzare *NDT* per valutare lo stato di danno delle strutture e per identificare i punti e le modalità di eventuali interventi di consolidamento. IAEA ha quindi inviato in sito una squadra di esperti per formare tecnici locali con le competenze necessarie per esaminare l'integrità degli edifici danneggiati dall'esplosione.

Per ottimizzare l'efficacia della missione essa è stata anticipata da un web-training finalizzato a fornire ai tecnici locali le conoscenze generali in merito ai materiali e alla concezione strutturale degli edifici; con l'occasione sono state meglio definite e condivise le attività da svolgere nel corso della successiva missione.



Fig. 3
Prove soniche effettuate durante il training a Surssock Palace, Beirut (foto D. Foppoli, 2021).

L'attività in sito a Beirut è stata effettuata nel mese di agosto 2021, ovvero appena le condizioni sanitarie legate alla pandemia l'hanno consentito, e ha coinvolto tre esperti che hanno operato assieme ad una squadra di dieci tecnici libanesi. Durante la missione, il team ha svolto attività di formazione pratica applicando le tecniche *NDT* direttamente sugli edifici danneggiati dall'esplosione. Tra gli altri è stato analizzato Surssock Palace, un palazzo storico del centro di Beirut costruito nel 1860 in stile veneziano, i cui proprietari dispongono di una significativa collezione di dipinti barocchi italiani. Queste particolari circostanze ci sollecitano a sottolineare le molteplici connessioni tra l'Italia e il Medio Oriente che, dal nostro punto di vista mediterraneo, dovremmo più propriamente definire Vicino Oriente in considerazione della prossimità di queste aree alla nostra storia ed alla nostra sensibilità culturale.

L'edificio, circondato da un parco privato affacciato sul porto di Beirut (luogo dell'esplosione), aveva subito rilevanti danni: lo spostamento d'aria l'aveva tra l'altro scoperchiato quasi completamente. L'addestramento compiuto ha comportato l'ispezione preliminare delle strutture danneggiate dal sisma (Manuale AeDES, 2014) che ha permesso di valutare il livello di danno e di stabilire un appropriato percorso della conoscenza (D.P.C.M. 9 febbraio 2011). La formazione è stata effettuata ponendo una serie di quesiti diagnostici relativi alla conformazione dei solai, alla consistenza delle murature e dei colonnati e alla geometria delle fondazioni, che sono stati affrontati operando con test non distruttivi, in particolare con i metodi sclerometrico, ultrasonico (Figura 3), magnetometrico e Ground Penetrating Radar (GPR).

La missione ha avuto un ottimo apprezzamento da parte dei tecnici locali, oltre che una notevole visibilità a livello internazionale, trovando una significativa eco presso la stampa estera (a titolo di esempio in Pakistan, Cina ed Arabia Saudita) oltre che presso il nostro Ministero degli Esteri e la missione italiana presso UN.

Il terremoto del 2023 in Siria e Turchia

Nella notte tra il 5 e 6 febbraio 2023 un forte evento sismico ha interessato l'area meridionale della Turchia, nei dintorni di Gaziantep, e alcune regioni settentrionali della Siria. Le scosse, raggiungendo intensità 7,8 Mw, hanno causato 53.537 vittime in Turchia e 8.476 vittime in Siria oltre ad estese devastazioni che hanno provocato due milioni di evacuati in Turchia e quattro milioni in Siria. È utile precisare che in Siria il terremoto ha colpito l'area tra Latakia, Idlib a Aleppo che, al momento dell'evento catastrofico, risultava ancora divisa tra le fazioni in conflitto a seguito della decennale e sanguinosa guerra civile; per questo non è stato possibile ottenere un conteggio attendibile delle vittime e dei danni. È necessario inoltre aggiungere che l'embargo che la Siria subisce da molti anni e i cattivi rapporti con la confinante Turchia hanno reso ancora più difficoltoso il supporto internazionale alle operazioni di soccorso nell'area affetta dal sisma entro i confini siriani. Pur in queste difficili condizioni logistiche e operative l'Agenzia Atomica ha inteso collaborare nel contesto dell'emergenza inviando, a supporto della popolazione colpita dal devastante terremoto, apparecchiature mediche e strumentazione ingegneristica utile a valutare i danni prodotti dal sisma sulle strutture civili e sulle infrastrutture. IAEA ha organizzato con la massima celerità resa possibile dalle già citate condizioni contestuali (nel maggio 2023), una prima missione a Damasco, con lo scopo di fornire ai tecnici locali le conoscenze di base per applicare le tecniche diagnostiche utili a valutare i danni prodotti dal terremoto.

Nell'ambito della missione è stato organizzato un *Workshop on NDT for Civil Engineering and Cultural Heritage Applications*, a cui hanno partecipato quindici tecnici (ingegneri, geologi e fisici) provenienti da Aleppo e da Latakia, aree direttamente sconvolte dal sisma, e da Damasco. Per ragioni di sicurezza legate al perdurare dei conflitti armati è stata purtroppo preclusa agli esperti di IAEA la possibilità operare direttamente sul sito del terremoto. Il workshop ha comportato approfondimenti in merito all'utilizzo di tecniche ispettive e di prove non distruttive finalizzate a determinare l'agibilità degli edifici dopo il sisma e a valutare i danni subiti e la possibilità di recupero dalle strutture danneggiate. È risultato molto efficace promuovere la presentazione di precedenti esperienze locali da parte dei tecnici siriani; ciò ha consentito di evidenziare come nella regione siano già disponibili significative competenze in merito alla conoscenza dei materiali e delle tecniche costruttive, all'effettuazione di ispezioni post-sisma e all'applicazione delle *NDT* su strutture civili e su beni culturali. È stato particolarmente lusinghiero ascoltare la relazione relativa alle prove per la caratterizzazione dinamica (Al-Kousa et al. 2017) effettuate sulla torre del Saladino nella cittadella di Damasco successivamente all'intervento di consolidamento realizzato una decina di anni prima grazie alla cooperazione italiana; le indagini hanno peraltro confermato appieno l'efficacia dell'intervento compiuto.

Anche durante la missione a Damasco è stato possibile avere la chiara percezione della significativa sintonia storica e culturale che lega l'Italia ad un paese come la Siria, che nel passato ha sempre avuto strette relazioni con il nostro. La grande moschea degli Omayyad a Damasco, una delle più antiche del mondo islamico, è paradigma di questa affinità: ha evidentemente l'impronta di una basilica paleocristiana e sorprendentemente è in parte destinata al culto cristiano in quanto custodisce il sepolcro di San Giovanni Battista, profeta riconosciuto da entrambe le religioni.

Nel corso della missione a Damasco sono stati consegnati due set completi di apparecchiature diagnostiche (Figura 4) che il ministero competente ha messo a disposizione dei laboratori delle associazioni degli ingegneri di Aleppo e di Latakia, in modo da consentire il rapido utilizzo in campo per supportare la popolazione colpita dal sisma.



Fig. 4
Il gruppo dei tecnici locali con l'attrezzatura donata da IAEA presso i laboratori AECS di Damasco (foto D. Foppoli, 2023).

L'attrezzatura donata dall'Agenzia Atomica alla Siria (analoga attrezzatura è stata successivamente donata anche alla Turchia) risulta completa e tecnologicamente molto avanzata: ogni set comprende magnetometro, sclerometro, strumentazione per la misura della Velocità degli Impulsi Ultrasonici (UPV), termocamera, strumentazione per misure Impact Echo e due modelli di Ground Penetrating Radar (GPR) caratterizzati rispettivamente da bassa frequenza e grande profondità di penetrazione (particolarmente idoneo per misure nei terreni), e da altissima frequenza ed elevata risoluzione. Quest'ultimo strumento è inoltre implementato con l'avanzato sistema Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW).

Una seconda missione a Damasco, effettuata nel giugno 2024, ha avuto lo scopo di valutare gli esiti delle prime attività intraprese nell'ambito del progetto di cooperazione tecnica e di rinforzare le competenze per l'utilizzo dell'attrezzatura *NDT* disponibile. È stato realizzato un training pratico in laboratorio e sono state fornite informazioni necessarie per l'applicazione delle metodologie di prova utili per l'esecuzione di complesse campagne diagnostiche. Sono state infine condivise linee-guida finalizzate a mettere a punto a livello nazionale le competenze necessarie alla valutazione diagnostica di strutture civili e beni culturali.

IAEA ha inteso in questo modo intraprendere assieme all'*Atomic Energy Commission of Syria* (AECS) un percorso di lungo periodo finalizzato a sviluppare nel paese centri di competenza per le *NDT*, dotati di personale formato e certificato. Questo consentirà in prospettiva di migliorare il livello qualitativo e l'affidabilità dei risultati delle prove, ottenendo un effetto positivo per l'intera industria delle costruzioni in termini di controllo, di manutenzione e di prevenzione.

Cooperazione Tecnica per integrare le competenze nazionali e regionali

Un maggiore impatto è stato inoltre raggiunto integrando le azioni delle controparti nazionali con progetti di Cooperazione Tecnica sviluppati su scala regionale; in questo mo-

do è stato possibile operare secondo politiche omogenee e coordinate a livello regionale, trasferire competenze tra le varie nazioni e integrare su scala inter-regionale i risultati ottenuti. Un esempio significativo di tale processo è costituito dall'accordo di cooperazione ARCAL¹ sviluppato nella regione Latino-America e Caraibi.

In questa area, fin dal 2017 i terribili effetti causati da ripetuti eventi sismici hanno dimostrato che non risultavano disponibili metodologie e competenze tecniche idonee e affidabili per effettuare valutazioni delle caratteristiche dei materiali e delle strutture attraverso l'esecuzione di prove non distruttive.

Questa circostanza è stata resa particolarmente evidente dal terremoto registrato il 19 settembre 2017, con epicentro nello stato di Puebla e magnitudo 7,1 Mw, che ha causato gravi danni anche in alcune aree di Città del Messico (Roeslin et al. 2018). Questo terremoto è avvenuto esattamente 32 anni dopo il 19 settembre 1985, quando un sisma di magnitudo 8,1 Mw con epicentro nello stato del Michoacán, lungo la costa del Pacifico, aveva provocato il crollo di centinaia di edifici (e oltre 4.000 vittime) a Città del Messico, ad una distanza di 400 km dall'epicentro. Lo studio del sisma del 1985 ha consentito di comprendere le cause del disastro, dovuto all'amplificazione delle onde sismiche provocata dai sedimenti alluvionali che costituiscono la piana in cui sorge Città del Messico (Singh et al. 1988). La ripetizione del fenomeno dopo oltre un trentennio, anche se con minore impatto, ha tuttavia messo in evidenza l'assenza di un'adeguata strategia di prevenzione finalizzata alla valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti.

A partire da questa constatazione, con l'obiettivo primario di contrastare gli effetti dei terremoti, è stato sviluppato tra il 2017 e il 2022 un progetto regionale RLA1014², finalizzato a migliorare la qualità delle tecniche di ispezione e di *NDT* applicate alle strutture civili. Sotto l'egida di questo progetto sono state realizzate numerose missioni di esperti in Messico, Ecuador (anche a seguito del terremoto dell'Esmeraldas del 16 aprile 2016, di intensità 7,8 Mw), Costa Rica, Perù e Cile, coinvolgendo decine di tecnici locali che sono stati formati in merito alle possibilità di valutare attraverso le *NDT* la sicurezza post-sisma ma anche la vulnerabilità strutturale dei manufatti civili.

Nell'ambito di queste attività AIPnD ha contribuito a realizzare attività di formazione virtuale ed in sito. Di conseguenza, dopo avere analizzato le esperienze compiute in tutto il mondo per la certificazione nel settore delle prove non distruttive nel campo dell'ingegneria civile, l'Agenzia ha scelto certificare il personale secondo lo schema di certificazione italiano UNI PdR 56:2019, attualmente aggiornato da UNI 11931:2024. Tale attività ha comportato l'effettuazione di uno specifico corso web svolto all'inizio di agosto 2022 e di un corso in presenza a Buenos Aires il successivo novembre, durante il quale sono stati approfonditi i metodi di prova oggetto di certificazione ed è stato effettuato il training pratico di laboratorio; i corsi e gli esami di certificazione sono stati tra l'altro impartiti in lingua spagnola, ovvero castellano secondo la declinazione latino americana. Al corso hanno partecipato oltre trenta tecnici di varia estrazione, da ingegneri civili a fisici nucleari a professori universitari, provenienti da nove paesi dell'America Latina e dei Caraibi; al termine del corso è stato effettuato l'esame di certificazione. Il successo dell'iniziativa è stato pieno, sia in termini di efficacia, che di apprezzamento dei partecipanti, di IAEA e dell'Asociación Argentina de Ensayos No Destructivos y Estructurales (AAENDE) che ha ospitato l'evento.

Ad esito del progetto RLA1014 sono stati infine costituiti tre centri di competenza regionali a Città del Messico, a Buenos Aires e a Santiago del Cile, dotati di un appropriato protocollo di gestione condiviso, allo scopo di migliorare nella regione la velocità e la capacità di reazione ai disastri naturali.

¹ ARCAL: Regional Cooperative Agreement for the Promotion of Nuclear Science and Technology in Latin America and the Caribbean.

² RLA1014: Advancing Non-Destructive Testing Technologies for the Inspection of Civil and Industrial Structure.



Fig. 5
Visita Scientifica di una delegazione di tecnici malesi presso un cantiere di restauro monumentale nel centro di Brescia (foto D. Foppoli, 2022).

Un riscontro significativo dell'efficacia del processo compiuto è stato ottenuto sul campo in occasione del successivo terremoto di intensità 6,9 Mw avvenuto il 18 marzo 2023, nella regione di Machala in Ecuador, che ha provocato 18 vittime ed estesi danni agli edifici. A seguito di questo evento l'Agenzia ha potuto organizzare molto rapidamente, già nel mese di giugno 2023, una missione di supporto che ha comportato attività di ispezione, *NDT* e training. Tale missione è stata effettuata coordinando la partecipazione di un esperto internazionale incaricato da IAEA, di due esperti provenienti dai centri di competenza regionali appena istituiti e di due esperti locali, provenienti da due università dell'Ecuador, con un approccio integrato e multi-livello che è risultato molto efficace ed efficiente.

La virtuosa esperienza messa a punto in America Latina viene attualmente sviluppata dall'accordo di cooperazione RCA³, relativo alla regione Asia e Sud Pacifico, dove è in corso dal 2019 un progetto per rafforzare e migliorare le competenze regionali nel settore *NDT* (RAS1022⁴), attualmente prorogato per il triennio 2023-2026 (RAS1029⁵). Per molti paesi dell'area sono già stati organizzati workshop ed attività di divulgazione. Si sottolinea in particolare l'efficacia di due visite scientifiche organizzate da AIPnD in Italia per tecnici Pakistani e Malesi, finalizzate a ampliare le loro competenze in merito alle applicazioni *NDT* e alla certificazione. Queste visite hanno comportato anche sopralluoghi in sito a cantieri di diagnostica e di restauro di edifici storici (Figura 5) che sono risultati molto formativi e sono stati estremamente apprezzati.

Il progetto si completerà, in analogia con quello già descritto in precedenza, con la certificazione del personale, che verrà anche in questo caso sviluppata sulla base dello schema normativo italiano, e con la costituzione di centri di competenza regionali, attivati per operare in Asia e nel Pacifico.

Conclusioni

La cooperazione tra AIPnD e IAEA ha consentito di evidenziare e valorizzare a livello internazionale le significative competenze disponibili nell'ambito nazionale italiano in

³ RCA: Regional Cooperative Agreement for Research, Development and Training Related to Nuclear Science and Technology for Asia and the Pacific.

⁴ RAS1022: Strengthening Regional Capacity in Non-Destructive Testing and Examination Using Nuclear and Related Techniques for Safer, Reliable, More Efficient and Sustainable Industries Including Civil Engineering.

⁵ RAS1029: Enhancing Regional Capabilities in Advanced Non-Destructive Testing Techniques for Improved Safety and Inspection Performance in Industries.

merito all'approccio alle ispezioni post-disastro ed all'utilizzo di tecniche *NDT* per la valutazione della stabilità delle strutture civili e dei beni culturali. In questo contesto sono state particolarmente riconosciute e apprezzate le nostre competenze nel settore dei beni culturali, che costituiscono a parere degli scriventi uno tra i principali capitali metodologici e tecnologici espressi dal nostro paese.

Il processo virtuoso attuato da IAEA con il supporto di AIPnD ha consentito di intervenire a seguito di disastri naturali e non naturali e di disseminare nei paesi di intervento conoscenze utili a migliorare il livello qualitativo dei processi di controllo, di manutenzione e prevenzione per l'intera filiera delle costruzioni.

Nel contempo, mediante progetti regionali integrati con progetti nazionali, è stato possibile costituire una rete di centri di competenza regionali, dotati di personale con capacità idonee e certificate per l'applicazione delle *NDT*, in grado di accrescere le potenzialità dei vari paesi, ma soprattutto in grado di operare con rapidità ed efficacia a seguito di disastri. Le attività di ispezione, prove non distruttive e training realizzate in sito possono essere così ottimizzate integrando le competenze di esperti internazionali, di esperti regionali che gravitano sui centri di competenza regionali e di esperti locali già formati nell'ambito dei programmi IAEA.

Bibliografia

- Guidebook on non-destructive testing of concrete structures*, 2002, Training Course Series No. 17, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- GONÇALVES L., RODRIGUES H., GASPARI F. (a cura di) 2018, *Non-destructive Techniques for the Assessment and Preservation of Historical Structures*, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL
- Forensic Insights for Future Resilience, Learning from Past Disasters*, 2024, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva.
- Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research*, 2011, IAEA Radiation Technology Series No. 2 International Atomic Energy Agency, Vienna.
- Guidelines on Training Syllabi in Non-destructive Testing for Civil Engineering (NDT-CE)*, 2024, Training Course Series No. 86, International Atomic Energy Agency, Vienna.
- HAMMOUD J. 2014, *Zokak el-Blat: Urban and Architectural Evolution (1840-1940)*, Thesis, Université Libanaise, Institut de Beaux-Arts, Centre de Restauration
- Conservation des Sites & Monument Historiques, Tripoli
- EL HAGE J., SHAHROUR I., HAGE CHEHADE F., ABI FARRAJ F. 2023, *A Comprehensive Assessment of Buildings for Post-Disaster Sustainable Reconstruction: A Case Study of Beirut Port*, «Sustainability» vol. 15.
- Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e Agibilità per edifici ordinari nell'Emergenza post-Sismica (AeDES)*, 2014, Collana Tecnica, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Seconda edizione.
- FOPPOLI D. 2016, *Inspections and NDT for the Characterization of Historical Buildings after Seismic Events: 2012 Emilia Earthquake*, in «Proceedings of 10th International Conference Structural Analysis for Historical Constructions (SAHC 2016)», Leuven.
- D.P.C.M. 9 febbraio 2011, *Linee guida per la valutazione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle «Norme tecniche per le costruzioni» ...*, norma italiana.
- UNI/PdR 56:2019, *Certificazione del personale tecnico addetto alle prove non distruttive nel campo dell'ingegneria civile, prassi di riferimento*, norma italiana.
- UNI 11931:2024, *Certificazione del personale tecnico addetto all'esecuzione delle prove non distruttive nel campo dell'ingegneria civile e dei beni culturali ed architetttonici*, norma italiana.
- AL-KOUSA M., HASAN H.T., ABDUL-WAHED M. 2017, *Experimental and analytical evaluation of the consolidation of tower 8 in the Damascus citadel*, «Arab J Geosci», vol. 10, No. 37.
- ROESLIN S., ELWOOD K.J., JUÁREZ-GARCIA H., GÓMEZ-BERNAL A., DHAKAL R.P. 2018, *The September 19th, 2017 Puebla, Mexico Earthquake – Preliminary Report*, in «Proceedings of New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference».
- SINGH S.K., LERMO J., DOMINGUEZ T., ORDAZ M., MENA E., QUAAS R. 1988, *The Mexico Earthquake of September 19, 1985 – A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone Site*, «Earthquake Spectra», vol. 4, No. 4.



Finito di stampare da
Rubbettino print | Soveria Mannelli (CZ)
per conto di FUP
Università degli Studi di Firenze
2025



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE