

L'Istituto Centrale per il  
Restauro e il patrimonio  
culturale nazionale

Alessandra Marino **p. 9**

Il ruolo di Lazio Innova per  
l'industria culturale regionale

Nicola Tasco **p. 15**

Il Distretto Tecnologico  
Culturale del Lazio: sfide e  
prospettive

Maria Sabrina Sarto **p. 19**

# Energia Ambiente e Innovazione

ENEA magazine

1/2022

[eai.enea.it](http://eai.enea.it)



Scienza, Tecnologia e Ricerca:  
la grande alleanza per l'Arte

**LE INTERVISTE:** Dario Franceschini  
Barbara Jatta  
Nicola Zingaretti

# Scienza, Tecnologia e Ricerca per il Patrimonio Culturale



di **Gilberto Dialuce**, *Presidente ENEA*

Il momento in cui stiamo per andare in stampa con questo numero di Energia, Ambiente e Innovazione è senz'altro uno dei più critici dalla fine della seconda guerra mondiale per gli scenari drammatici che stanno minando alla radice certezze che pensavamo ormai consolidate.

Perché allora dedicare proprio adesso un approfondimento della nostra rivista scientifica al patrimonio culturale, al possibile ruolo dei privati e delle istituzioni questo campo e al contributo che può dare la ricerca scientifica alle sfide che abbiamo davanti per la valorizzazione, conservazione e fruizione? Una prima risposta emerge dall'intervista al Ministro della Cultura, Dario Franceschini, pubblicata a pag. 6, dalla quale si evidenzia l'importanza del rapporto tra ricerca e arte a tutto vantaggio della miglior tutela e valorizzazione del patrimonio culturale. Un secondo elemento di rilievo è che la cultura implica anche valori come l'inclusività, lo sviluppo e la crescita socioeconomica, per ripartire dopo una lunga fase di emergenza. E il patrimonio artistico e culturale del nostro Paese, "misurabile" anche dalla presenza del maggior numero di siti Unesco al mondo (ben 58 nel 2021), può rappresentare uno dei punti fermi sui quali concentrare gli sforzi.

Giustamente il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza dedica a questa voce un'intera Missione, con quasi 4,3 miliardi di investimenti, ai quali aggiungere il miliardo e mezzo circa del Piano Strategico Grandi attrattori culturali per finanziare 14 interventi di tutela, valorizzazione e promozione e rilanciare questo settore, fra i più colpiti dalla pandemia (occupazione in calo del 3,5%, mentre il valore aggiunto del Sistema Produttivo Culturale e Creativo si è contratto dell'8%).

Oggi il PNRR non solo può dare una boccata di ossigeno, ma deve e può imprimere un forte impulso a questo comparto.

Un altro motivo che ci ha spinti ad approfondire questa tematica è la consolidata tradizione ENEA nelle attività di ricerca e innovazione per il patrimonio culturale, sempre più diffuse in tutti i nostri dipartimenti, in modo trasversale e collaborativo.

L'ENEA opera nel settore del patrimonio culturale da svariati decenni nei quali ha sviluppato competenze tecnico-scientifiche e professionalità molto qualificate e diversificate per offrire soluzioni innovative a istituzioni pubbliche, private e imprese; nei nostri centri di ricerca della Casaccia e di Frascati in particolare, sono disponibili infrastrutture per indagini, caratterizzazioni, diagnostica, restauro, studio e messa in sicurezza di beni appartenenti al vasto mondo dell'Arte.

Qui sono nati il prototipo di laser scanner per monitorare lo stato di conservazione di dipinti e affreschi, i sensori hi tech per l'analisi e il controllo della vulnerabilità di ponti e viadotti di interesse storico-artistico come quello di Spoleto, prodotti bio-based e microorganismi per il biorestauro delle statue dei giardini Vaticani o dei marmi di Michelangelo a Firenze, le tecnologie per la ricostruire e rendere fruibile in 3D opere ad accesso limitato, i basamenti per proteggere i Bronzi di Riace dai terremoti.

Non di rado queste tecnologie vengono da contesti molto lontani dai beni culturali: è il caso dei sofisticati sistemi laser scanner per 'indagare' sulle opere d'arte nati nel Dipartimento Fusione nucleare e sicurezza, così come gli strumenti opto-elettronici per l'analisi spettrale e strutturale nei reattori a fusione o fissione,



riadattati per far riemergere dettagli nascosti nei dipinti e ripensamenti dell'autore, per analizzare un sito archeologico o un'opera d'arte inamovibile o dal trasporto rischioso.

Un altro esempio sono le tavole vibranti collocate presso la hall sismica del nostro Centro della Casaccia, alle porte di Roma, un impianto tra i più grandi d'Europa e all'avanguardia nella strumentazione e nelle tecniche di analisi dei dati di vibrazione, con notevoli applicazioni in recenti progetti per la protezione e la conservazione dei beni culturali.

Ma c'è anche altro: in ENEA questo comparto è una delle sei priorità strategiche del Programma di Knowledge Exchange lanciato nel 2018 dalla nostra Direzione Innovazione e sviluppo insieme a Confapi, CNA, Confartigianato, Confindustria, Unioncamere, per dar vita a partnership fra ricerca e imprese al fine di rafforzare il trasferimento tecnologico. Allo stesso modo, con la Regione Lazio abbiamo in corso oltre dieci progetti che vedono i nostri ricercatori lavorare fianco a fianco di imprese del settore dei beni culturali.

Come evidenziano i numerosi contributi della sezione 'Focus ENEA' della rivista, il ruolo della scienza e della tecnologia nella tutela del patrimonio culturale è cresciuto enormemente negli ultimi anni, anche grazie alla capacità di proporre analisi quantitative della composizione dei materiali, metodi innovativi di datazione e indagini strutturali macro e micro. Tutto ciò senza dimenticare l'importantissimo capitolo degli interventi di efficientamento energetico sugli edifici storici.

Di fatto, quindi, si tratta di un argomento centrale che è importante trattare forse proprio in un momento come questo. Perché tutelare l'Arte, la Bellezza, l'Eredità del passato, renderle sempre più fruibili, condivise e valorizzate non significa solo investire in uno dei settori più strategici del nostro Paese ma anche darsi obiettivi e valori di riferimento essenziali, alla base della nostra cultura di libertà di espressione democratica, in una prospettiva che guarda oltre le gravi difficoltà del momento.

## Un'alleanza per l'Arte



In un Paese con un patrimonio culturale unico come il nostro le attività di tutela, conservazione, restauro, valorizzazione hanno una valenza inestimabile anche sotto altri aspetti, a livello sociale, economico, di occupazione solo per citarne alcuni. In questo contesto, la ricerca scientifica può dare un contributo di grande rilievo rendendo disponibili strumentazioni, metodologie e procedure sempre più avanzate per il monitoraggio, la diagnostica, la messa in sicurezza e la fruizione dei beni artistici e paesaggistici.

Nelle pagine che seguono raccontiamo come l'ENEA opera in questo campo, quali sono le professionalità, i servizi e le infrastrutture disponibili, i progetti e le prospettive.

Lo abbiamo fatto anche in vista del Salone Internazionale del Restauro di Ferrara, dando spazio ai nostri ricercatori e ai direttori dei Dipartimenti coinvolti ma anche raccogliendo i contributi di esperti, istituzioni, protagonisti del settore per offrire una panoramica il più ampia possibile e una pluralità di punti di vista alla luce delle sfide e dei possibili traguardi da raggiungere. Troverete quindi gli interventi del ministro della cultura **Dario Franceschini**, di **Alessandra Marino** che dal febbraio 2021 dirige l'Istituto Centrale del Restauro, una delle più prestigiose istituzioni del settore a livello nazionale e internazionale, del Presidente di Lazio Innova **Nicola Tasco** e di **Maria Sabrina Sarto**, Presidente del Centro di Eccellenza DTC Lazio, Professore Ordinario e Prorettrice alla Ricerca di Sapienza Università di Roma, esponenti di una realtà fra le più dinamiche in Italia per investimenti nella tutela del patrimonio culturale e nella costruzione di partnership fra ricerca e imprese.

Il tema strategico della digitalizzazione viene affrontato da **Eleonora Lorenzini**, Direttore Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali del Politecnico di Milano e da **Carminio Marinucci**, Presidente dell'Associazione internazionale *#DiCultHer*, mentre il Presidente della Regione Lazio **Nicola Zingaretti** sottolinea l'importanza di investire nella conservazione e valorizzazione per dare nuovo slancio anche all'economia che gravita intorno a questo settore.

Per la copertina abbiamo scelto l'immagine del Sarcofago degli Sposi esposto nel Museo Etrusco di Valle Giulia a Roma, al centro del progetto (MONALISA) MONitoraggio Attivo e Isolamento da vibrazioni e Sismi di oggetti d'Arte. Qui, insieme ad altri partner, ENEA ha reso disponibili tecnologie innovative per il monitoraggio dell'impatto delle vibrazioni sismiche e di quelle indotte dal traffico sugli oggetti d'arte quali sistemi di isolamento, prove su tavole vibranti e sensori in fibra ottica.

Prima di augurarvi buona lettura vorrei chiudere con una nota positiva, quella che emerge dall'intervista alla direttrice dei Musei Vaticani, **Barbara Jatta**, ed è la crescente affluenza nei musei di giovani sotto i 30 anni, sempre più interessati a "fruire del bello e dei valori che sono dentro le nostre collezioni".

È un messaggio di speranza, per quanto piccolo, in uno dei momenti più bui della nostra recente storia.

Cristina Corazza

N. 1 Gennaio - Aprile 2022

## Direttore Responsabile

Cristina Corazza

## Comitato di direzione

Ilaria Bertini, Alessandro Coppola, Alessandro Dodaro,  
Giorgio Graditi, Roberto Morabito

## Comitato tecnico-scientifico

Paola Batistoni, Marco Casagni, Francesco Gracceva,  
Mario Jorizzo, Chiara Martini, Federica Porcellana,  
Franco Roca

## Redazione

Laura Di Pietro, Roberto De Ritis, Paola Giaquinto,  
Laura Moretti, Fabiola Falconieri (per i testi in inglese)

## Progetto grafico ed elaborazione tecnica

Paola Carabotta

## Edizione web

Antonella Andreini, Serena Lucibello

## Promozione e comunicazione

Paola Giaquinto

## Stampa

Laboratorio Tecnografico  
Centro Ricerche ENEA Frascati  
Numero chiuso nel mese di aprile 2022

## Registrazione

Tribunale Civile di Roma  
Numero 42/2019 del 28 marzo 2019  
(versione stampata)  
Numero 43/2019 del 28 marzo 2019  
(versione telematica)

Foto in copertina attribuzione Sailko, CC BY-SA 4.0  
Wikimedia Commons



## 22

L'Innovazione Digitale nei Beni e nelle Attività Culturali  
di *Eleonora Lorenzini*

- 01 Scienza, Tecnologia e Ricerca per il Patrimonio Culturale di *G. Dialuce*
- 03 Un'alleanza per l'Arte di *C. Corazza*

## GLI INTERVENTI

- 06 Riportare la cultura al centro delle politiche del governo  
di *D. Franceschini*

## GLI SCENARI

- 09 L'Istituto Centrale per il Restauro e il patrimonio culturale nazionale  
di *A. Marino*
- 15 Il ruolo di Lazio Innova per l'industria culturale regionale di *N. Tasco*
- 19 Il Distretto Tecnologico Culturale del Lazio: sfide e prospettive di *M. S. Sarto*
- 22 L'Innovazione Digitale nei Beni e nelle Attività Culturali di *E. Lorenzini*
- 25 Per una cultura digitale consapevole di *C. Marinucci*
- 31 L'efficienza energetica per gli edifici storici di *I. Bertini*
- 34 Il Knowledge Exchange Program dell'ENEA per i beni culturali  
di *M. Casagni*
- 36 Le potenzialità delle diagnostiche ottiche e spettroscopiche di *A. Dodaro*
- 40 Promuovere l'innovazione presso gli stakeholder di *R. Fantoni*
- 44 Strumenti e tecnologie ICT per conservare, conoscere e valorizzare  
il patrimonio culturale di *G. Graditi*
- 47 L'arte come patrimonio da valorizzare di *R. Morabito*

## LE INTERVISTE

- 53 *B. Jatta*  
Apriamo sempre più i nostri Musei per condividere i valori dell'Arte

# Sommario



**25** Per una cultura digitale consapevole  
*di Carmine Marinucci*

**34** Il Knowledge Exchange Program  
dell'ENEA per i beni culturali  
*di Marco Casagni*

**40** Promuovere l'innovazione presso gli  
stakeholder  
*di Roberta Fantoni*

**56** *N. Zingaretti*  
Per i beni culturali è fondamentale investire su innovazione&imprese

**96** La salvaguardia dei beni culturali dai rischi naturali e antropici  
*di P. Clemente*

## FOCUS ENEA

**60** La diagnosi energetica di edifici di pregio storico-artistico  
*F. Caffari, N. Calabrese, M. Morini*

**100** Il progetto MONALISA di *L. Sorrentino, O. AlShawa, M. A. Vincenti, P. Clemente, F. Paolacci, M. Malena, C. Castino, A. M. Cicalese, M. Lamonaca, M. P. Guidobaldi*

**64** Approcci innovativi al restauro: l'esperienza del progetto ES-PA  
*di L. Migliorini*

**104** Il progetto H-S3D: elementi intelligenti in stampa 3D  
*di M. Caponero, M. Imbimbo, A. Pelliccio, A. Graziani e S. Marfia*

**67** Curare le opere d'arte con l'estratto di liquirizia di *F. Tasso e G. Migliore*

**107** Le sorgenti laser al servizio dei beni culturali  
*di V. Spizzichino*

**72** Il progetto SIS-DAT per la Simulazione dei Danni da Terremoto  
*di G. Buffarini, S. Hailemikael, G. Martini*

**110** Le radiazioni ionizzanti in 'soccorso' dei beni culturali  
*di A. Cemmi, I. Di Sarcina, B. D'Orsi, C. Ferrante, M. Oliviero, J. Scifo, A. Verna, M. Vadrucchi*

**75** Nuovi prodotti da specie vegetali multifunzionali per la conservazione dei  
beni culturali di *C. Alisi, L. Bacchetta, F. Falcon*

**113** Il contrasto al deterioramento causato dall'umidità spaziale di *F. Colao*

**118** La spettroscopia Raman per la cura e la conservazione di beni archivistici  
*di S. Botti, F. Bonfigli, V. Nigro*

**79** Tavole vibranti e protezione antisismica di edifici e monumenti storici  
*di I. Roselli, V. Fioriti, A. Cataldo, M. Baldini, A. Colucci, A. Picca*

**122** L'ENEA per il progetto E-RIHS  
*di M. Guarnieri, L. Caneve, V. Lazic e I. Roselli*

**83** Analisi di antichi tappeti cinesi di seta e metallo di *D. M. Gattia, P. Moiola, C. Seccaroni*

**125** Stampa 3D e nanomateriali per riparare i danni del tempo  
*di R. D'Amato, M. Imbimbo, A. Pelliccio, S. Marfia*

**86** Il sistema integrato Museum Remote Control  
*di M. Mongelli, M. Puccini, B. Calosso, A. Perozziello, S. Pierattini, F. Simoni, S. Migliori, E. Giangiulio, L. Ferrari*

**128** Tecniche di imaging 3D ad alta risoluzione  
*di M. Francucci, M. Guarnieri, R. Fantoni, M. Ciaffi, M. Pistilli, M. Mongelli, S. Pierattini, M. Puccini*

**89** Tecnologie robotiche per i beni culturali di *R. dell'Erba, G. Cupertino, L. Blasi*

**132** Le tecniche neutroniche applicate ai beni culturali  
*di V. Nigro, R. Fantoni, R. M. Montereali, M. Pillon*

**92** Il Sistema di Supporto alle Decisioni CIPCast DSS per le aree storiche  
*di S. Giovinazzi, L. Giordano, A. Di Pietro, M. L. Villani, A. De Nicola, M. Pollino, V. Rosato*

## Riportiamo la cultura al centro delle politiche del governo



Dario Franceschini, Ministro della cultura

**Ministro dei Beni Culturali e del Turismo dal 2014 al 2018 e poi ancora dal settembre 2019 ad oggi, in questi anni Dario Franceschini si è dato come priorità di riportare la cultura al centro delle politiche del governo. In questa intervista gli abbiamo chiesto quale è il bilancio della sua lunga attività di governo che ha attraversato periodi molto sfidanti anche per le ripercussioni della pandemia da COVID-19.**

Al ministero ho vissuto due fasi ben distinte, non solo da ragioni dovute alla diversità del contesto politico delle due differenti esperienze, ma anche da un evento come la pandemia destinato a segnare una forte cesura nella storia recente dell'umanità. Da quando ho giurato per la seconda volta da Ministro, il 4 settembre 2019, all'inizio della pandemia, sono trascorsi meno di 5 mesi: il bilancio non può che essere articolato tenendo conto di questo aspetto. Nella prima esperienza si è curato il rilancio del mondo della cultura, innanzitutto riportando il bilancio del Ministero sopra i 2 miliardi di euro dal misero miliardo e mezzo in cui era precipitato dopo la crisi del 2008: nello specifico, è stato innalzata a circa 470 milioni di euro la quota per gli investimenti per la tutela del patrimonio, cifra mai raggiunta in precedenza e pari a sette volte quanto stanziato nel punto più basso della curva. Si è rivoluzionato inoltre la struttura del Ministero, con la nascita dei musei autonomi, abbiamo introdotto importanti agevolazioni fiscali per chi investe nella tutela del patrimonio e sono state migliorate quel-

le esistenti, come il potenziamento e l'innalzamento al 40% del Tax Credit Cinema.

### **E nella seconda fase?**

In questa seconda esperienza, quella della pandemia, ha prevalso la necessità di aiutare il mondo della cultura a compiere la traversata del deserto, destinando oltre 4,6 miliardi di euro al sostegno di cinema, teatri, musei e lavoratori dei diversi settori creativi. Ma non si è perso di vista l'obiettivo generale, perseguito con successo nell'arco dell'intera esperienza al MiC: riportare la cultura al centro delle politiche del governo. Un'ambizione sottolineata dall'aver voluto un G7 e un G20 Cultura negli anni in cui l'Italia è stata presidente di turno di queste organizzazioni e nell'impegno internazionale in favore della cultura, affermando la leadership italiana a livello mondiale in questo settore. E lo stiamo vedendo proprio in questa drammatica guerra in cui attorno alla nostra azione di diplomazia culturale si stanno compiendo importanti passi a sostegno del popolo ucraino.

**Al momento del suo insediamento, nel 2014, lei ha detto "Guido il più importante ministero economico del nostro Paese". E' stato così in questi anni?**

Allora il Ministero includeva la delega per il turismo. Ora non è più così e, con l'avvento del governo Draghi, ha preso il nome che gli compete: Ministero della Cultura. Ma rimane sempre il maggior ministero economico del



Paese, perché custodisce e valorizza l'anima stessa del nostro Paese, ciò che lo rende unico e ammirato in tutto il mondo: il suo patrimonio culturale. Insieme a ciò che ne deriva, ossia l'industria creativa, il comparto che ha maggior futuro nel mondo di domani. L'investimento in cultura è una grande leva della nostra politica economica.

**Il PNRR prevede 4,275 miliardi di investimenti per la cultura, più i 1,460 miliardi del Piano Strategico Grandi attrattori culturali per finanziare 14 interventi di tutela, valorizzazione e promozione culturale. Ritieni che siano sufficienti per fare del nostro capitale culturale una leva di sviluppo e ripartenza economica del Paese?**

A queste risorse si sono aggiunti altri 200 milioni di euro per 38 ulteriori interventi e 3 acquisizioni al patrimonio dello Stato. La cultura ha un ruolo importante all'interno del PNRR, a dimostrazione della sua ritrovata centralità. È un fatto fondamentale, che assicura che nei prossimi anni si continuerà su questa strada, garantendo alla cultura le risorse necessarie per divenire il fulcro della crescita sostenibile dell'Italia.

**Nel luglio 2021 al G20 di Roma la cultura è entrata per la prima volta nell'agenda dei lavori, a conferma del ruolo cruciale nella crescita sostenibile dell'economia e nelle politiche di sviluppo. Nell'occasione è stata anche istituita una Ministeriale Cultura permanente in seno ai lavori del G20 ed è stata approvata la Dichiarazione di Roma: quali sono a suo giudizio i passaggi più importanti?**

Non si è trattato di una dichiarazione simbolica, ma di un documento in 32 punti che è stato studiato e condiviso nei contenuti per mesi tra molti Paesi prima di arrivare all'approvazione. Ne dobbiamo essere davvero molto orgogliosi. Se ne parlerà per molti anni come di un punto di inizio: si introduce la Cultura nei lavori del G20. Tra i punti molto qualificanti della Dichiarazione di Roma c'è il fatto che l'appuntamento è stato reso permanente, come avevamo chiesto in questo foro che è per sua natura prettamente economico. Questa è la prova che anche i politici hanno capito l'importanza della cultura, anche in termini di PIL. Finalmente si riconosce che investire in cultura significa investire anche in crescita economica sostenibile e creazione di posti di lavoro.

**La Dichiarazione riconosce il ruolo della cultura nel portare a soluzioni per affrontare il cambiamento climatico. Quale è il legame fra cultura e contrasto al global change?**

Il riconoscimento dei diversi approcci al rapporto tra uomo e ambiente nelle differenti culture costituisce un indubbio arricchimento e può indicare vie più efficaci rispetto a quella finora percorsa dal mondo occidentale per arrivare a un corretto equilibrio tra le esigenze di sviluppo e il rispetto dell'ecosistema e del paesaggio, con dirette conseguenze sulle cause del cambiamento climatico.

**Ministro, al suo nome è legata l'introduzione dell'Art Bonus, un credito d'imposta del 65% per privati e imprese che donano una somma per il restauro del patrimonio culturale pubblico o per attività di musei, fondazioni lirico-sinfoniche o teatri di tradizione. Si è parlato spesso della necessità di dar vita ad un'alleanza pubblico-privata per il patrimonio culturale. Lei che idea si è fatto in merito?**

Nel corso degli anni sono stati raccolti con l'Art Bonus oltre 600 milioni di euro: una cifra importante ma si può fare ancora di più. Anche perché nonostante l'Italia abbia adesso il più alto sgravio fiscale vigente in Europa per l'investimento in cultura, le nostre grandi aziende sono ancora timide all'utilizzo dell'Art Bonus. Il mondo aziendale è rimasto ancorato alla vecchia logica della sponsorizzazione, che lega il brand all'azione culturale, non comprendendo il cambio di paradigma dettato dalla pandemia. È necessaria ora più che mai una maggiore responsabilità sociale delle imprese, improntata a una liberalità disinteressata nei confronti del patrimonio culturale, perché esso costituisce parte essenziale del successo di un'azienda: rende il territorio più attrattivo, favorendo l'insediamento di personale altamente qualificato nelle aziende che vi risiedono, e contribuisce alla fama del marchio trasferendovi la propria aura. Tutto questo non può non essere riconosciuto dall'intelligenza di un imprenditore e merita di essere premiato, tanto più che grazie all'Art Bonus si generano importanti vantaggi fiscali.

**Che importanza hanno a suo giudizio la ricerca scientifica e l'innovazione tecnologica nella tutela, conservazione e fruizione dei beni culturali? È possibile dar vita ad una vera e propria alleanza fra ricerca e arte? E che cosa si sta facendo per**



### **accrescere il trasferimento dai laboratori ai musei?**

Il rapporto tra ricerca e arte risulta fondamentale: dalla diagnostica scientifica per i restauri al controllo satellitare dei movimenti tellurici per il monitoraggio dei siti archeologici, dalla sicurezza antisismica alla microclimatologia dei depositi e delle sale espositive, sono centinaia le connessioni tra i due mondi. I nostri istituti di eccellenza, a partire dall'ISCR alla Patologia del Libro e all'Opificio delle Pietre Dure di Firenze, sono in costante contatto con il mondo accademico in un reciproco scambio di esperienze e conoscenze a tutto vantaggio della miglior tutela e valorizzazione del patrimonio culturale. Con ENEA, poi, abbiamo dato vita nel 2018 al Centro di Eccellenza del Distretto Tecnologico per i Beni e le Attività Culturali del Lazio, che ha proprio l'obiettivo di accrescere lo scambio di conoscenze tra laboratori e musei coinvolge diverse realtà: le Università Sapienza, Roma Tre, Tor Vergata, Tuscia, Cassino e del Lazio meridionale, insieme a CNR e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, che in quattro anni ha raggiunto ottimi risultati.

**Un'ultima domanda. Nel periodo storico che stiamo vivendo, digitalizzare il patrimonio culturale significa sicuramente migliorarne la fruizione dando anche la possibilità di raggiungere un pubblico più ampio e diversificato. Quali altri vantaggi e quali criticità ritiene possano esserci per la divulgazione grazie all'applicazione delle ICT?**

In questo rapporto virtuoso tra ricerca e cultura la digitalizzazione merita un posto a sé. Tanto è vero che ho voluto con forza la nascita di due istituti: la Digital Library e il Museo dell'Arte Digitale di Milano. La pandemia ha mosso una grande domanda di fruizione virtuale della cultura, che non si esaurirà con il ritorno alla normalità. Andare in questa direzione, inoltre, ha il merito di incoraggiare e favorire la ricerca storica, che potrà godere di fonti d'archivio digitalizzate in numero sempre più consistente, aprendo nuovi orizzonti.

# L'Istituto Centrale per il Restauro e il patrimonio culturale nazionale

L'Istituto Centrale per il Restauro svolge un ruolo essenziale al servizio del patrimonio culturale nazionale a livello di ricerca, formazione e sperimentazione multidisciplinare. Dalla sua fondazione, le sue attività si sono progressivamente ampliate ed 'evolute' verso un concetto di restauro più ampio e moderno, di conservazione, con il crescente coinvolgimento di professionalità scientifiche e attività di sviluppo e valutazione di materiali e metodologie innovative.

DOI 10.12910/EAI2022-007



di Alessandra Marino, Direttrice dell'Istituto Centrale per il Restauro

Il 18 ottobre 1941 si inaugurava a Roma l'Istituto Centrale del Restauro, divenuto operativo solo due anni dopo a causa dell'interruzione imposta dalla guerra. Le sue radici affondano nella memorabile relazione "Restauro delle opere d'Arte. Progettata istituzione di un Gabinetto centrale del restauro" presentata da Giulio Carlo Argan al Convegno dei Soprintendenti nel luglio del 1938, i cui contenuti confluiscono rapidamente nella legge istitutiva 22 luglio 1939 n. 1240. L'innovativa proposta Argan di creare una struttura pubblica di ricerca, di riferimento per l'intera nazione, rispondeva all'avvertita urgenza di trasformare il restauro da pratica artigianale o "artistica", quale era, in restauro "scientifico". Si trattava, cioè, di sottrarre l'atto del restaurare al piano dell'empirismo per ricondurlo a quello del rigore metodologico, fondato sull'approccio multidisciplinare, sulla base di una chiara



Fig. 1 Gabinetti scientifici ICR negli anni Quaranta e nel 1962 (ICR - fig. 1 n.LN1412)



Fig. 2 Baia (Napoli). Smart boe utilizzate nel Parco Marino

conduzione storico critica. La realizzazione dell'ambizioso progetto è affidata a Cesare Brandi, all'epoca poco più che trentenne, fondatore dell'Istituto e suo primo direttore fino al 1961<sup>1</sup>.

Brandi mette a punto un altrettanto innovativo modello di organizzazione del lavoro, basato sul coinvolgimento delle diverse professionalità necessarie alla migliore riuscita dell'intervento, chiamate a operare in équipe sulla base delle rispettive competenze: un modello che i sociologi hanno ascritto tra i "gruppi creativi" presenti in Europa tra la seconda metà dell'Ottocento e la prima del Novecento. Le scienze e la tecnologia rivestono nel nuovo Istituto un ruolo importante, per il convincimento della loro indiscutibile utilità nella pratica della conservazione, anche se il loro impiego è ritenuto "sussidiario" all'azione del conservatore o del restauratore. Già nel progetto iniziale figuravano proposte concrete in termini di fattibilità, con la specifica delle strutture e dotazioni indispensabili per la ricerca pura e applicata: tra queste, un gabinetto di fisica e radiografia e un gabinetto di chimica; per l'insegnamento nella Scuola erano previste anche le scienze naturali.

### Sinergie col mondo della ricerca scientifica e dell'industria

Punto critico era dotare l'Istituto del personale addetto ai laboratori scientifici e pertanto, inizialmente, si attinse ai ruoli dei professori della scuola. A distanza di vent'anni questo problema non era risolto, a fronte di un periodo di particolare sviluppo delle scienze, e ciò induceva Brandi ad

attivare collaborazioni con le università, fino ad auspicare la creazione di un'intera facoltà di scienze all'interno dell'ICR. Le stesse difficoltà persistono sotto la direzione di Pasquale Rotondi (1961-1973), nonostante l'applicazione della fisica al campo della conservazione si fosse evoluta e ampliata, la strumentazione risultasse potenziata e nel campo della biologia fossero avviate numerose linee di ricerca. Rotondi caldeggiava dunque tutte le possibili sinergie col mondo della ricerca scientifica e dell'industria. Questo orientamento era condiviso dal suo successore Giovanni Urbani, restauratore e storico dell'arte, direttore dell'ICR dal 1973 al 1983.

Urbani, da tempo interno all'Istituto, era consapevole della necessità di rifondare la ricerca scientifica del settore attivando collaborazioni con enti pubblici e privati, avendo ben chiaro che nell'ambito della conservazione fosse indispensabile estendere il campo d'indagine dalle opere al loro ambiente. Per dare concretezza e sviluppo alle tante sinergie, Urbani, nel 1974, sottoponeva al Ministero della Pubblica Istruzione una proposta di ampliamento della pianta organica dell'Istituto, con un sensibile aumento delle professionalità scientifiche. Con l'istituzione, un anno dopo, del Mini-



Fig. 3 Baia (Napoli). Attività di schedatura di beni sommersi mediante l'uso di tablet



Fig. 4 Matera. Documentazione 3D, prove sperimentali e analisi numeriche sul comportamento dinamico di manufatti archeologici

stero per i Beni Culturali e Ambientali<sup>2</sup>, il ruolo dell'ICR veniva potenziato con l'attribuzione di nuovi compiti fra cui la "ricerca scientifica" finalizzata non soltanto all'esecuzione dei restauri ma anche alla "preservazione e tutela" dei beni culturali. Si segnava così il passaggio dal concetto di **restauro a quello, più ampio e moderno, di conservazione**, che sarà ripreso trent'anni dopo nell'articolo 29 del Codice dei beni culturali e del paesaggio.

**La ricerca e la sperimentazione scientifica presso l'Istituto Centrale per il Restauro**

Nell'Istituto esistono oggi quattro laboratori scientifici: **chimica, prove sui materiali, fisica e controlli ambientali, biologia**. Le professionalità scientifiche forniscono il supporto agli interventi di conservazione e restauro eseguendo indagini per la caratterizzazione dei materiali costitutivi, per lo studio dei fenomeni di alterazione e conducendo ricerche per lo sviluppo e la valutazione di materiali e metodologie innovative per il restauro. Presso i laboratori si conserva l'archivio delle sezioni stratigrafiche e delle sezioni sottili prodotte dall'ICR dagli anni '50 a oggi (oltre 7000) che rappresentano una preziosa raccolta di informazioni su tante opere d'arte che oggi è pos-

sibile analizzare con strumentazioni molto più sensibili e sofisticate, permettendo così di ampliare le informazioni ottenute negli studi passati. **Nella Scuola di Alta Formazione e Studio si insegnano le discipline specialistiche e si seguono gli aspetti tecnico scientifici delle tesi di laurea degli allievi.**

Tante le attività formative, anche nell'ambito di corsi e stage organizzati in Italia e all'estero e numerosi i lavori svolti in sinergia, nell'ambito di progetti nazionali e internazionali, con Università ed Enti di Ricerca, con l'obiettivo di proporre, modificare, spe-

rimentare e mettere a punto materiali e metodi di restauro innovativi, idonei ai differenti materiali costitutivi dei beni culturali.

Tra i numerosi progetti di ricerca che negli ultimi anni hanno coinvolto i laboratori scientifici ICR si ricordano: il progetto **NanoCathedral** (2015-2018), finanziato dal programma dell'Unione europea Horizon 2020 che ha avuto la finalità di sviluppare nano-materiali e procedure per la conservazione della pietra deteriorata in edifici monumentali e architetture contemporanee; il progetto **WOODPLAKE Archaeological Wooden Pile-Dwelling in Mediterranean European lakes: strategies for the exploitation, monitoring and conservation**, presentato nell'ambito del *Joint Programming Initiative on Cultural Heritage* (JPI CH), anch'esso finanziato con fondi dell'Unione Europea Horizon 2020, il cui principale obiettivo è la valutazione dell'impatto dei cambiamenti ed eventi climatici sulla conservazione e salvaguardia delle palafitte nei laghi del Mediterraneo.

**Sperimentazione in corso di materiali e metodi green**

**Da molti anni i laboratori scientifici ICR, insieme ai laboratori di restauro,**



Fig. 5 Matera, S. Lucia alle Malve. Rilievo 3D della chiesa dopo la disinfezione delle superfici lapidee

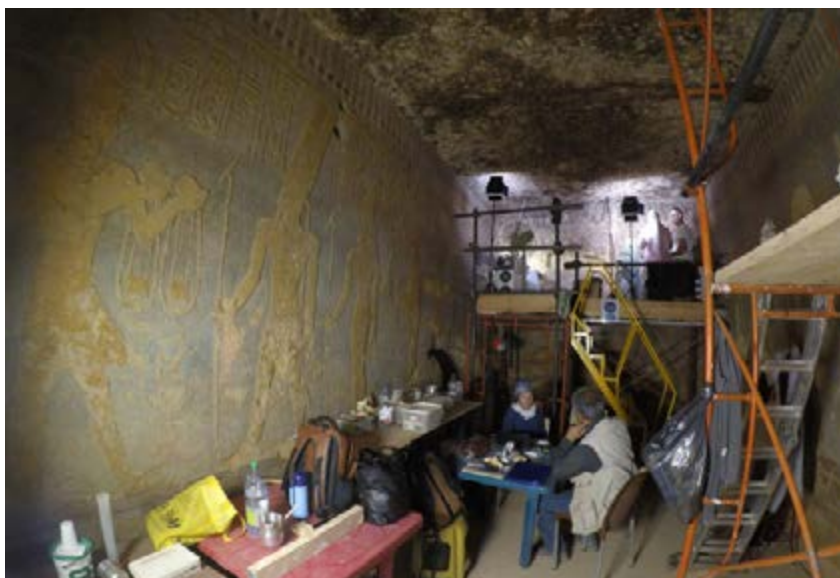


Fig. 6 Sudan, Jebel Barkal. Operatori italiani e sudanesi al lavoro

sono orientati alla sperimentazione e all'impiego di materiali e metodi di intervento ecocompatibili a base di sostanze naturali applicabili in solventi atossici. In questo ambito si collocano alcuni progetti di ricerca avviati nel corso del 2020-21, sviluppati nel contesto di collaborazioni formalizzate in accordi quadro e accordi di ricerca. Alcuni progetti sono stati finanziati dalla Regione Lazio (bando DTC per la seconda fase e bando POR FESR Lazio 2014-2020).

Tra questi si ricordano: **NYMPHA**: Natural polySaccharides from Microalgae for the Protection of cultural HeritAge, che mira alla produzione e sperimentazione di un nuovo prodotto per il restauro, a base di polisaccaridi estratti da alghe unicellulari, eco-compatibile e non tossico per l'uomo e per l'ambiente, verificando la possibile azione protettiva e consolidante; **BIONA-NOINLEGNO**: INnovazioni BIO e NANOTecnologiche nel de-restauro, conservazione e restauro sostenibile dei Manufatti in LEGNO dei Beni Culturali, progetto pilota di sviluppo sperimentale col fine di valutare l'efficacia di trattamenti innovativi

sostenibili, basati su bionanotecnologie per il de-restauro e il restauro di manufatti lignei; il progetto **ONTECH**: Old New TECHnology, finalizzato alla produzione di malte di restauro eco-friendly con elevate prestazioni in termini di resistenza e durevolezza, con minima produzione di CO<sub>2</sub>, non dannose per l'uomo e compatibili con le malte antiche; **NanoMAIA**: Nano Material Applications for Innovative conservation of Art works, finalizzato alla sperimentazione di un materiale nanocomposito di origine naturale e di natura mista, per il consolidamento strutturale di materiali tessili degradati.

Nel quadro degli studi su prodotti e sistemi a basso impatto ambientale è in corso una ricerca per la valutazione dell'efficacia di sostanze naturali con azione antimicrobica, quali gli oli essenziali, per la disinfezione di patine biologiche su manufatti lapidei, in alternativa ai biocidi chimici di sintesi. Ancora, nel tema della sostenibilità ambientale rientra lo studio sull'efficacia di sistemi messi a punto dall'Università di Granada per il bioconsolidamento dei materiali carbonatici da applicare nel restauro di beni culturali.

Tra i molteplici progetti di ricerca ai quali partecipano i laboratori dell'ICR, **ARTEMISIA** (ARTificial intelligence Extended-Multispectral Imaging Scanner for In-situ Artwork analysis): propone l'implementazione di una tecnologia innovativa per l'identificazione in-situ dei materiali pittorici, definita come BR-RIS (broad spectral range reflectance imaging spectroscopy). Un altro progetto, condiviso con l'Istituto Centrale dei Beni Sonori e Audiovisivi (ICBSA) è invece finalizzato alla conoscenza dei materiali costitutivi, delle forme di degrado e alla definizione dell'intervento di restauro di una serie di dischi fonografici.

#### I progetti del Programma Operativo Nazionale Cultura e Sviluppo

Un ulteriore importante ambito nel quale l'Istituto è costantemente impegnato riguarda i **progetti del Programma Operativo Nazionale Cultura e Sviluppo 2014-2020 (PON)**, finanziati dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale (FESR), uno dei principali strumenti finanziari della politica di coesione dell'UE. In questi progetti, le attività di ricerca e innovazione si affiancano a interventi di valorizzazione e recupero di beni del territorio. Negli ultimi tre anni l'Istituto ha coordinato e gestito due importanti progetti PON: il "MUSAS - MUSEi di Archeologia Subacquea - Tutela valorizzazione e messa in rete del Patrimonio Archeologico Subacqueo", per la valorizzazione e conservazione del patrimonio sommerso di alcuni siti della Campania, Calabria e Puglia, nonché "Capolavori in 100 km". Un viaggio reale, quest'ultimo, nella cultura della Basilicata "per conoscere, conservare, valorizzare" che ha visto una pluralità di interventi di conservazione preventiva in diversi musei della Basilicata e in alcuni importanti siti della città di Matera. In entrambi i casi sono stati condotti monitoraggi strumentali per la raccolta di dati ambientali ed è stato privilegiato l'impiego di sistemi di rile-

vamento fortemente innovativi, spesso sviluppati ad hoc nell'ambito delle attività di ricerca previste nel progetto.

### Progetti internazionali

Tra le attività che da sempre caratterizzano l'ICR, vanno ricordate quelle svolte a livello internazionale, quasi sempre contraddistinte da due linee di intervento parallele: il restauro di siti del patrimonio culturale e l'organizzazione di corsi di formazione. Tutti gli interventi condotti all'estero si sono basati su una forte impostazione multidisciplinare, i risultati della ricerca scientifica sono stati costantemente applicati alla conservazione e al restauro e hanno costituito argomento di formazione; molto richieste le attività di supporto alla creazione di centri di restauro, impostati secondo il modello dell'Istituto.

Tra i più recenti e interessanti interventi all'estero si ricorda quello in Sudan, nella regione di Karima, dove si trova l'importante sito archeologico di Jebel Barkal con i resti del tempio dedicato alla dea-madre dell'Antico Egitto Mut. Per l'intervento di restauro dei dipinti murali ed il recupero architettonico di parti del tempio, svolto in stretta collaborazione con il personale



Fig. 7 Distribuzione di beni sul territorio nazionale dalla banca dati di *Vincoli in Rete*

sudanese, sono state poi impiegate tecniche innovative di documentazione e rilievo mediante scanner di ultima generazione, nonché l'uso di laser per la pulitura.

Molto recentemente l'Istituto è stato indicato come rappresentante del Ministero per la Cultura quale membro per l'Italia all'Open Method Coordination (OMC) "Strengthening Cultural Heritage Resilience for Climate Change", gruppo di lavoro istituito in seno alla Commissione Europea con l'obiettivo di identificare e scambiare buone pratiche e misure innovative per la tutela del patrimonio culturale in re-

lazione al cambiamento climatico. Da parte del gruppo di lavoro della Commissione un particolare apprezzamento è stato rivolto ai sistemi *Vincoli in Rete* e *Carta del Rischio*, che consente la sovrapposizione dei beni presenti sul territorio nazionale con le mappe di rischio ambientale, antropico e strutturale. La Carta del Rischio è stata selezionata fra le *best practice*, diventando il modello per l'*upscaling* del sistema di monitoraggio del territorio a livello europeo, ed è attualmente transitata tra gli strumenti di competenza della Direzione Generale Sicurezza del Patrimonio Culturale.

### Il ruolo dell'ICR a livello nazionale e internazionale

L'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) è organo tecnico del Ministero della Cultura specializzato nel campo del restauro e della conservazione del patrimonio culturale. Afferisce alla **Direzione Generale Educazione Ricerca e Istituti Culturali** ed è dotato di autonomia scientifica, finanziaria, organizzativa e contabile. E' centro di riferimento a livello nazionale e internazionale; svolge un'intensa attività di consulenza, anche in relazione alla creazione di laboratori di restauro all'estero.

Presso l'ICR opera la **Scuola di Alta Formazione e Studio (SAF)**, cui compete l'attività formativa dei futuri restauratori secondo quanto disposto all'art. 29 del "Codice dei beni culturali e del paesaggio". Il diploma finale è equiparato a laurea magistrale abilitante alla professione.

L'ICR, istituito con la Legge n. 1240 del 22 luglio 1939, su suggerimento di Giulio Carlo Argan, e inaugurato nel 1941, fu diretto fino al 1961 da Cesare Brandi. I compiti attuali sono pressoché identici a quelli individuati all'atto della fondazione. La novità della sua impostazione consiste nell'unicità di un organismo in cui si svolgono contemporaneamente la ricerca, la formazione e l'attività sistematica e continua di restauro e sperimentazione. Nella struttura convivono storici dell'arte, architetti, archeologi, fisici ed esperti nei con-

trolli ambientali, chimici, biologi, restauratori delle diverse tipologie di materiali costitutivi dei manufatti di interesse storico e culturale (dipinti, mosaici, tessuti, opere su carta, metalli, ceramiche, pietre, cuoio, legno ecc.). La consapevolezza della interdisciplinarietà come fondamento di una corretta pratica del restauro è stata alla base dell'ormai consolidato metodo di lavoro. Ancora oggi l'attività dell'Istituto prosegue secondo le indicazioni teoriche e metodologiche tracciate da Brandi, sviluppando e approfondendo alcuni spunti: la conservazione preventiva, l'aggiornamento tecnologico e scientifico applicato alle opere d'arte, soprattutto per quanto riguarda le prove non distruttive, la realizzazione di importanti restauri come la Basilica di Assisi prima e dopo il terremoto, il Cenacolo di Leonardo, il Marc'Aurelio capitolino, i reperti subacquei come i bronzi di Riace o il Satiro di Mazara del Vallo, le pitture murali di Tarquinia e Pompei, la Torre di Pisa, il Colosseo. Importante è stata la realizzazione del Sistema Informativo Territoriale della "Carta del rischio del Patrimonio Monumentale", sviluppata dall'ICR a partire dall'inizio degli anni novanta del novecento, che documenta la vulnerabilità del patrimonio, monumentale e archeologico, distribuito nelle città storiche e nel territorio italiano in relazione ai principali fenomeni di rischio naturale e antropico. Scopo della Carta del Rischio è la definizione di una politica programmata di prevenzione, di interventi conservativi, manutentivi e di restauro, ed è attualmente transitata tra le competenze della neoistituita Direzione Generale Sicurezza del Patrimonio Culturale, del quale costituisce uno dei principali strumenti operativi.

**Alessandra Marino** dirige l'Istituto Centrale per il Restauro dal febbraio 2021. Laureata in architettura, in precedenza ha diretto il Servizio III – Tutela del patrimonio storico, artistico e architettonico – della DG Archeologia, belle arti e paesaggio, curando la progettazione e la direzione dei lavori di una cinquantina di cantieri di restauro, tra i quali il complesso mediceo-laurenziano (basilica di San Lorenzo, vestibolo della Biblioteca Laurenziana, Sagrestia Nuova, Cappella dei Principi).

Dall'agosto del 2009 al giugno 2016 è stata Soprintendente Belle Arti e Paesaggio per le province di Firenze, Pistola e Prato, incarico assunto dopo un breve periodo di direzione della Soprintendenza di Bologna, Modena e Reggio Emilia. Dal novembre 2014 al marzo 2015 è stata contemporaneamente direttore *ad interim* della ex Soprintendenza speciale per il patrimonio storico artistico ed etnoantropologico e per il polo museale della città di Firenze, con la responsabilità di tutti i principali musei statali.

Dal 2004 al 2009 è stata Responsabile Unico del Procedimento per alcuni interventi nel complesso di Brera a Milano: restauro del Cortile d'Onore, nuova centrale termica, progetto preliminare e svolgimento della gara europea per l'affidamento di servizi di progettazione definitiva ed esecutiva per l'ampliamento e il riallestimento della Pinacoteca.

Dal settembre 2009 al luglio 2016 ha ricoperto il ruolo di Responsabile Unico del Procedimento per il progetto "Nuovi Uffici" che ha consentito, tra l'altro, l'apertura di 56 nuove sale espositive. Dal 1997 al 2011 è stata docente a contratto di "Restauro Architettonico" presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara e, dal 2000 al 2010, docente a contratto di "Architettura del Paesaggio" presso l'Università degli Studi "Suor Orsola Benincasa" di Napoli.

Dottore di ricerca in Conservazione dei Beni Architettonici, Accademico d'onore dell'*Accademia delle Arti del Disegno*, ha concentrato in particolare la propria attività di studio sull'architettura del Sei-Settecento con numerose pubblicazioni sull'argomento, nonché su temi legati alle tecniche storiche, senza trascurare pubblicazioni specificamente connesse alle molteplici declinazioni dell'attività di tutela.

1. Per la storia dell'Istituto Centrale del Restauro dalla sua fondazione ai primi anni '80 cfr. C. BON VALSASSINA, *Restauro made in Italy*, Milano 2006, con bibliografia precedente
2. Il Ministero per i Beni Culturali e Ambientali fu istituito da Giovanni Spadolini con decreto-legge 14 dicembre 1974, n. 657 convertito, con modificazioni, nella legge 29 gennaio 1975, n. 5.

# Il ruolo di Lazio Innova per l'industria culturale regionale

Il Lazio è la seconda regione italiana per generazione di ricchezza e occupazione nel sistema produttivo culturale e creativo nazionale, con 13,5 miliardi di euro, circa 190 mila lavoratori e il 13,4% delle imprese nazionali del comparto con 36.739 unità produttive. In questo contesto si colloca la missione di Lazio Innova a sostegno della rete del sistema culturale regionale, con azioni e servizi per imprese, startup, creativi e amministrazioni locali, tramite la gestione diretta di misure regionali ad hoc e attività di supporto all'innovazione.

DOI 10.12910/EAI2022-008



di Nicola Tasco, Presidente di LAZIO INNOVA SPA

Il Lazio è da sempre sinonimo di cultura: un insieme straordinario di luoghi che spazia tra archeologia, arte, borghi storici e monumenti naturali, in un territorio in cui l'industria culturale è in grado di creare ricchezza e lavoro proprio in virtù di questo immenso patrimonio di Beni e Attività unico al mondo. Patrimonio che la programmazione della Regione Lazio mette a sistema, unendo il mondo della produzione e della ricerca, dell'università e dell'innovazione in un ecosistema attivo e creativo al servizio della società. Dal report "Io sono Cultura 2021" della fondazione Symbola, il Lazio risulta essere la seconda regione per generazione di ricchezza e occupazione nel sistema produttivo culturale e creativo italiano, con 13,5 miliardi di euro e circa 190 mila lavoratori attivi nel settore. Nella nostra regione ha sede il 13,4% delle imprese nazionali del comparto con 36.739 unità produttive. Inoltre, il Lazio è al primo posto nei settori cine-

**matografico, audiovisivo e musicale, con l'11,9% in termini di specializzazione, rispetto a una media nazionale del 6%.**

In tale prospettiva, la missione di Lazio Innova è orientata al sostegno della rete del sistema culturale regionale, attraverso una serie di azioni e servizi







per imprese, startup, creativi e amministrazioni locali, tramite la gestione diretta delle misure regionali ad hoc, ma anche attraverso attività di supporto all'innovazione del settore culturale. Fra queste, ad esempio, il programma di open innovation, o le attività dei nostri Spazi Attivi diffusi su tutte le province del Lazio e con le sinergie di internazionalizzazione del tessuto produttivo con quello accademico e della ricerca, anche attraverso la sottoscrizione di accordi quadro con i distretti dell'innovazione esteri, come nel caso della nostra recente missione a Expo 2020 Dubai.

#### **Il Distretto tecnologico per i beni e le attività culturali (DTC) del Lazio**

La nostra principale attività di innovazione nella conservazione, fruizio-

ne e valorizzazione dei beni artistici e paesaggistici ci vede impegnati nel "Distretto tecnologico per i beni e le attività culturali (DTC) del Lazio": un progetto finanziato dalla Regione Lazio e dal MIUR, con il supporto del MIBACT, che coinvolge le Università Sapienza, Tor Vergata, Roma Tre, gli atenei della Tuscia e di Cassino e i centri di ricerca CNR, ENEA e INFN. Con una dotazione iniziale di 41,7 milioni di euro per realizzare 5 grandi interventi, il DTC punta a valorizzare il patrimonio culturale del Lazio. Il primo intervento è stato avviato nel 2018 con un finanziamento della Regione Lazio e del Miur di 6 Milioni di euro, incrementati dalla Regione con altri 3 Milioni di euro nel 2021 a seguito degli ottimi risultati raggiunti. **Operativamente, il Centro di ec-**

**cellenza DTC Lazio è costituito da tre hub che riguardano le tecnologie digitali e la virtualizzazione, le diagnostiche, la conservazione, il restauro e la progettazione e gestione delle risorse.**

Con 275 tra laboratori e istituti di ricerca divisi in 12 reti e 6 differenti unità di ricerca, il DTC Lazio ha lo scopo di aggregare le tecnologie e il know-how degli enti fondatori per integrare le competenze da applicare alla conservazione, valorizzazione e promozione del patrimonio storico-artistico regionale, connettendo il mondo della ricerca con quello dell'impresa e delle istituzioni.

Il Centro di eccellenza ha finora attivato in totale 21 master, 10 Corsi di Alta Formazione, 2 Corsi di Apprendimento Permanente di rilevanti di-

## La missione di Lazio Innova a sostegno dell'innovazione e dello sviluppo

LAZIO INNOVA, **società in house della Regione Lazio**, partecipata anche, con quota di minoranza, dalla **Camera di Commercio di Roma**, è il risultato del processo di riordino delle società della Regione Lazio dedicate all'**innovazione, al credito e allo sviluppo economico** previsto dalla legge regionale n. 10/2013. La società opera a vantaggio delle imprese e della pubblica amministrazione locale nell'erogazione di **incentivi** a valere su risorse regionali, nazionali e/o europee; nel **sostegno al credito** e rilascio di garanzie; negli interventi nel **capitale di rischio**; nei servizi per l'**internazionalizzazione**, promozione delle reti d'impresa e delle **eccellenze regionali**; nei servizi per **nascita e sviluppo d'impresa**; nelle misure per l'inclusione sociale.

Svolge inoltre funzioni di assistenza tecnica specialistica alla Regione Lazio, con particolare riferimento all'attuazione della **Programmazione europea** e nazionale, supportando la Cabina di regia per l'attuazione delle politiche regionali ed europee nella definizione e nell'attuazione del Piano unitario regionale delle politiche regionali ed europee e nel coordinamento della programmazione, gestione, funzionamento, monitoraggio e controllo dei Programmi regionali cofinanziati dai Fondi comunitari (FESR, FSE+, FEAMP e FEASR), dal Fondo di Sviluppo e Coesione (FSC) e da ulteriori risorse comunitarie e nazionali destinate al Lazio.

È responsabile per conto della Regione dell'attuazione di specifici progetti di sviluppo e **internazionalizzazione** ed è incaricata di seguire i programmi Europei per l'innovazione attraverso l'analisi, l'ideazione di progetti di cooperazione e l'implementazione di servizi e attività a vantaggio del sistema innovativo laziale.

Lazio Innova gestisce il Fondo di **Fondi Fare Lazio** istituito dalla Regione Lazio nell'ambito della programmazione europea 2014-2020 per la gestione degli strumenti finanziari a sostegno delle imprese. Il fondo è suddiviso in due sezioni:

1. **Fare Credito** articolata in diversi strumenti a sostegno dell'accesso al credito delle PMI, flessibili e scalabili, la cui dotazione complessiva iniziale di 62 milioni di euro è stata incrementata nel tempo fino a superare i 455 milioni di euro.

2. **Fare Venture** che interviene con 68,5 milioni di euro nel capitale di rischio ed è a sua volta suddivisa in due parti:

- **Lazio Venture**
- **Innova Venture**

La dotazione di Fare Lazio è in corso di ampliamento per un importo complessivo di 165 milioni di euro a valere sulle risorse della Programmazione 2021-27, di cui 110 milioni di euro dedicati agli strumenti della Sezione Fare Credito.

Nell'ambito delle proprie funzioni di assistenza tecnica alla Regione e di gestione della **Rete Spazio Attivo** Lazio Innova, informa cittadini, imprese, enti locali e associazioni sulle politiche comunitarie e i programmi di finanziamento regionali, per sensibilizzare il territorio sulle principali priorità europee e per promuovere la cittadinanza attiva a livello locale e regionale, in stretto raccordo con gli Sportelli Europa della Regione.

Infine, attraverso la partecipazione all'**ENTERPRISE EUROPE NETWORK (EEN)**, offre un sistema integrato di servizi per aiutare le aziende a individuare nuovi partner commerciali, produttivi e tecnologici all'estero e per sostenere l'innovazione, il trasferimento tecnologico e per promuovere la partecipazione delle PMI ai bandi europei.

mensioni, 9 MOOC (Massive Online Open Course) e 8 progetti di altra tipologia tra summer/winter school, training camp e contamination lab, concedendo oltre 430 Borse di stu-

dio. Inoltre, sono stati finanziati 38 Progetti di ricerca sviluppo e innovazione che coinvolgono attualmente oltre 100 tra dipartimenti universitari, laboratori e istituti di ricerca

insieme a 88 imprese e 35 titolari di beni culturali.

Il secondo grande intervento ha riguardato la valorizzazione del patrimonio culturale della Regione

attraverso la ricerca e lo sviluppo di tecnologie per la conservazione, fruizione e gestione, innovative a livello internazionale.

**Ad oggi si è conclusa la fase relativa alla progettazione, partita nel 2020, con 49 progetti tutti completati per un finanziamento complessivo di oltre 3,8 milioni di euro.** La seconda fase sostiene adesso la realizzazione di questi progetti di estrema rilevanza strategica e culturale per il terri-

torio e coinvolge 95 Comuni per la valorizzazione di 246 Luoghi della Cultura. L'investimento complessivo per l'intervento supera i 23 milioni di euro di fondi già disponibili, che saranno ulteriormente incrementati con altre risorse nella nuova programmazione.

**Le nuove tecnologie applicate al patrimonio culturale possono giocare, dunque, un ruolo fondamentale e positivo nel miglioramento**

**delle condizioni e nell'incremento della pubblica fruizione dei beni culturali, modernizzandone l'offerta.** Ad esempio, nuove tecnologie quali realtà virtuale, realtà aumentata, ologrammi interattivi, modelli 3d, catalogazione massiva digitale, favoriscono la messa a disposizione del pubblico delle opere e rendono il patrimonio culturale più evidente, comprensibile e fruibile a cittadini e visitatori attraverso il web.

Nicola Tasco, avvocato tributarista, è Presidente di LAZIO INNOVA SPA, società per l'innovazione e lo sviluppo della Regione Lazio. Si occupa di fiscalità delle imprese, di fiscalità delle operazioni straordinarie nonché dei fondi comuni di investimento. Presta, inoltre, la propria assistenza in relazione a questioni di diritto societario nel contesto dell'attività ordinaria e straordinaria di società e gruppi di società transnazionali.

Per INTESA SANPAOLO ha lavorato a New York assistendo società italiane che operavano negli Stati Uniti d'America. Si è occupato quindi della predisposizione della contrattualistica relativa ad operazioni di finanziamento bancarie nonché di operazioni di finanza strutturata.

È Membro dell'Organo di Governo del CTNA (Cluster Tecnologico Nazionale Aerospazio), del Comitato Direttivo di AN-FIR (Associazione Nazionale delle Finanziarie Regionali), del Progetto di Diritto Tributario dell'Ordine degli Avvocati di Roma, del Consiglio Direttivo della Camera Nazionale e Internazionale dell'Ordine degli Avvocati di Roma. È stato coordinatore del Comitato Scientifico dell'Osservatorio sui Conflitti e sulla Conciliazione. È autore del libro: "Fisco, l'amore tradito" – EPC Editore, 2015.

# Il Distretto Tecnologico Culturale del Lazio: sfide e prospettive

Il Distretto Tecnologico Culturale del Lazio nasce per sviluppare e trasferire tecnologie innovative per la valorizzazione, conservazione, recupero, fruizione e sostenibilità dei beni e delle attività culturali, rafforzando il settore imprenditoriale della Regione. Dopo essersi affermato come realtà vincente a livello regionale, oggi il Centro di Eccellenza del DTC Lazio è pronto per aprirsi a opportunità e collaborazioni internazionali.

DOI 10.12910/EAI2022-009



di Maria Sabrina Sarto, Presidente del Centro di Eccellenza DTC Lazio, Professore Ordinario e Prorettrice alla Ricerca di Sapienza Università di Roma

Il Distretto Tecnologico Culturale del Lazio è nato con l'obiettivo di sviluppare e trasferire al settore dei beni e delle attività culturali tecnologie innovative per la valorizzazione, conservazione, recupero, fruizione e sostenibilità del patrimonio culturale, rafforzando il settore imprenditoriale e quindi del territorio della Regione Lazio. Un territorio che - come ha recentemente indicato il report "Io sono Cultura 2021" della fondazione Symbola - nel Sistema Produttivo Culturale e Creativo italiano **risulta essere la seconda regione per generazione di ricchezza e occupazione e una regione in cui risiede il 13,4% delle imprese nazionali del settore.** Dopo essersi affermato come realtà vincente a livello regionale, **oggi il Centro di Eccellenza del DTC Lazio è pronto ad aprirsi a opportunità e collaborazioni internazionali.** Quando nacque, nel 2018, risultando vincitore del bando di cui all'Avviso pubblico "Intervento I

CENTRO DI ECCELLENZA composto da Anagrafe delle Competenze e Polo di Innovazione Regionale Diffuso su Tecnologie e Materiali finalizzato anche allo sviluppo di artigianato artistico di qualità" - Distretto Tecnologico per le Nuove Tecnologie applicate ai Beni e alle Attività Culturali (DTC), il progetto per l'attuazione del piano di avviamento del Centro rappresentava la scommessa delle università statali e dei centri pubblici di ricerca a costituire un vero e proprio ecosistema della ricerca, della formazione e dell'innovazione nel settore delle tecnologie per il patrimonio culturale, che agisse da volano per il rilancio del territorio e del sistema delle piccole e medie imprese del Lazio.

**Investimenti per 80 milioni di euro**

La costituzione nel 2020 del Centro di Eccellenza DTC Lazio come As-

sociazione ha rappresentato il primo passo verso la conferma che la scommessa potesse essere considerata una sfida vinta e oggi possiamo affermare che **il DTC Lazio è l'ecosistema che promuove e sostiene la ricerca, la formazione e lo sviluppo nella filiera delle tecnologie applicate ai beni e alle attività culturali nel Lazio**, vantando un'esperienza pluriennale che ha prodotto risultati concreti e ha portato la Regione a investire per il distretto culturale quasi 80 milioni di Euro.

Con l'impegno prioritario a sostenere e promuovere la qualificazione e la specializzazione del capitale umano, attraverso la formazione e l'alta formazione al servizio del territorio, del tessuto imprenditoriale e delle nuove professioni, il Centro di Eccellenza ha erogato: Master, con un numero complessivo di 138 iscritti; Corsi di **alta formazione**, con un numero complessivo di 219 iscritti; Corsi di Apprendimento Permanente, che hanno visto la



partecipazione di oltre 90 discenti, e Massive Online Open Courses (MOOCs), fruibili via rete e in modalità «open», attivati su piattaforma COURSERA, con oltre 25.000 discenti online. Recente è anche l'attivazione di due Contamination Labs. L'attività del Centro non si è arrestata neppure durante la pandemia, con un fitto programma di incontri e di confronti in modalità telematica.

Il Centro di Eccellenza ha messo in rete competenze, ha creato opportunità di collaborazione, ha fornito sostegno anche economico ai giovani, alle imprese e a tutti coloro che operano nel mondo della cultura e della creatività, per sviluppare progetti sostenibili in grado di coniugare crescita economica, innovazione e coesione sociale, valorizzando le relazioni con le altre istituzioni, con gli operatori dell'in-

novazione e con le infrastrutture del sapere e della ricerca.

#### **Cooperazione attiva tra ricerca, università e industria**

Ma la vera novità del Centro di Eccellenza è stata, la messa a sistema di risorse tecnico-scientifiche, imprenditoriali, istituzionali, connettendo e valorizzando competenze esistenti di ricerca, formazione e trasferimento tecnologico. In particolare, la Comunità di oltre 700 ricercatori si è connessa con il tessuto imprenditoriale del Lazio attraverso una Infrastruttura di ricerca costituita ad oggi da 275 laboratori e 12 reti di laboratori operanti sui tre HUB: tecnologie digitali e virtualizzazione; tecnologie per la diagnostica, conservazione e restauro; tecnologie per progettazione e gestione risorse.

L'obiettivo è ora quello di estendere a livello nazionale e europeo, e oltre, lo schema vincente di cooperazione attiva tra ricerca/università/industria, che si è concretizzato con il CdE DTC Lazio a livello regionale dal 2019 al 2021.

I due convegni annuali del DTC Lazio, che si sono tenuti a distanza di due anni a causa della pandemia, hanno mostrato una comunità coesa e collaborativa, che lavora in stretta sinergia con le imprese del territorio, valorizzando competenze e patrimonio culturale e creando nuove opportunità di fruizione attraverso l'implementazione di nuove tecnologie che guardano al green e alla transizione digitale.

L'ultima settimana di marzo ha visto all'Expo di DUBAI il DTC Lazio per dare testimonianza di questa realtà unica a livello nazionale, prospettando le opportunità internazionali



di crescita e di sviluppo, anche attraverso presentazione del **Progetto Atlante Lazio Antico Meridionale**, e di altri 23 progetti di ricerca e sviluppo che spaziano dalla dia-

**gnostica, conservazione e promozione del patrimonio alla gamification**, con lo scopo di incentivare l'attrattività del territorio regionale nei confronti di studenti stranieri su

tematiche e metodologie promosse dalle Università partner del Centro di Eccellenza.

La prossima sfida che attende il Centro di Eccellenza DTC Lazio è l'ambizione di trasformare il convegno annuale in un congresso internazionale che porti a Roma le comunità internazionali, che operano nei distretti regionali culturali di altri paesi Europei, del Mediterraneo e di oltreoceano, per confrontarsi sul tema dello sviluppo sostenibile, delle tecnologie applicate alla valorizzazione, fruizione, conservazione del patrimonio e alla promozione e sostegno delle attività culturali. Si tratta di un auspicio e di un invito aperto a tutta la comunità che opera in questo settore di eccellenza e di rilevanza strategica per la Regione Lazio.

**Maria Sabrina Sarto** è Professore Ordinario di Elettrotecnica presso Sapienza Università di Roma. E' stata Direttore del Centro di Ricerca per le Nanotecnologie applicate all'ingegneria della Sapienza dal 2006 al 2015 e Direttore del Dipartimento di Ingegneria Astronautica Elettrica ed Energetica di Sapienza dal 2016. Dal 2021 è Prorettrice alla Ricerca in Sapienza, dopo esser stata Prorettore alle Infrastrutture e Strumenti per la Ricerca di Eccellenza presso l'Ateneo romano a partire dal 2015. Dal 2018 è Coordinatrice del Centro di Eccellenza DTC Lazio e dal 2020 Presidente dell'Associazione Centro di Eccellenza DTC Lazio.

E' autrice di oltre 200 articoli scientifici su riviste internazionali e sugli atti di congressi internazionali altamente qualificati, e di diversi brevetti nel settore delle nanotecnologie, della schermatura elettromagnetica, della sensoristica. Ha coordinato numerosi progetti di ricerca finanziati da istituzioni nazionali, dall'Unione Europea e da imprese.

Ha ricevuto numerosi riconoscimenti scientifici e premi; nel 2010 è stata nominata Fellow dell'IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineering) per il contributo eccezionale nel settore dei "Materiali avanzati per la Compatibilità Elettromagnetica" e nello stesso anno ha ricevuto il premio "Sapienza Ricerca".

# L'Innovazione Digitale nei Beni e nelle Attività Culturali

L'Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali nasce nel 2016 nell'alveo degli Osservatori Digital Innovation del Politecnico di Milano per supportare il processo di adozione dell'innovazione digitale nelle istituzioni culturali e come luogo di incontro e confronto tra attori diversi dell'ecosistema culturale. Nel corso degli anni si consolida come punto di riferimento in Italia per lo studio dell'innovazione digitale nei Beni e Attività Culturali e come uno dei principali promotori di un cambiamento la cui necessità è sempre più avvertita.

DOI 10.12910/EAI2022-010



di **Eleonora Lorenzini**, *Direttrice Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali del Politecnico di Milano*

**L'**Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali nasce nel 2016 nell'alveo degli Osservatori Digital Innovation del Politecnico di Milano per supportare il processo di adozione dell'innovazione digitale nelle Istituzioni culturali e come luogo di incontro e confronto tra attori diversi dell'ecosistema culturale.

Nel corso degli anni si consolida come punto di riferimento in Italia per lo studio dell'innovazione digitale nei Beni e Attività Culturali e come uno dei principali promotori di un cambiamento la cui necessità è sempre più avvertita dalle istituzioni culturali stesse.

Per raggiungere questi obiettivi **affianchiamo la ricerca sul campo, il cuore del nostro lavoro, con un'intensa attività di promozione di un confronto qualificato tra i diversi attori dell'ecosistema culturale** i quali hanno la possibilità di accedere alle analisi e ai dati raccolti dall'Osservatorio, ma anche di

incontrarsi, scambiare opinioni e riflettere su nuovi possibili modelli di offerta culturale in occasione di incontri riservati più o meno formali, che hanno lo scopo di mettere in connessione, ma anche di aiutare a trovare un linguaggio comune tra le diverse anime protagoniste dell'innovazione del settore, da quella storico-artistica, a quella manageriale, a quella tecnologica.

**Un pilastro fondamentale dell'Osservatorio è anche la comunicazione e diffusione, attraverso iniziative pubbliche e presenza sulla stampa, dei risultati della ricerca e di best practice** (che spesso nascono proprio dal confronto che si genera nella Community) che possono fornire elementi utili a indirizzare le decisioni strategiche delle istituzioni culturali e proseguire il percorso verso la trasformazione digitale. **Il Premio annuale Gianluca Spina per l'Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali** promosso dall'Osservatorio, non solo rappresenta un momento di valorizza-

zione e riconoscimento pubblico di un caso di successo, ma vuole anche essere l'occasione attraverso cui i diversi soggetti chiamati a candidare i propri progetti possono prendere consapevolezza del percorso fatto e sistematizzare i passi compiuti e i risultati ottenuti.

## **Sfide e opportunità che l'ecosistema culturale si trova ad affrontare**

La costante interazione con le istituzioni culturali fa del nostro un punto di osservazione privilegiato circa le sfide e le opportunità che attendono l'ecosistema nei prossimi anni che, grazie anche alle risorse del PNRR, potranno segnare un vero e proprio momento di accelerazione verso una trasformazione avviata, ma che fatica a decollare. All'interno del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), infatti, vengono stanziati 6,68 miliardi per la Componente 3 (Turismo e Cultura 4.0) della Missione 1 (Digitalizzazione,



Innovazione, Competitività, Cultura e Turismo). A questi fondi, provenienti direttamente dal PNRR, va ad aggiungersi 1 miliardo e 46 milioni di euro proveniente dal Fondo Complementare per un totale di 8,13 miliardi di euro che ci si auspica vadano impiegati per interventi strutturali.

**L'innovazione digitale potrà avere importanti riflessi su tutta la catena del valore delle istituzioni culturali.** Guardando ad esempio ai musei, la pandemia ha dato uno slancio importante sul fronte dell'offerta di servizi online come la biglietteria. Sono passati dal 23% del 2019 al 39% del 2021 i musei, monumenti e aree archeologiche italiani che mettono a disposizione la possibilità di acquistare il biglietto su internet e nel 50% con la possibilità di saltare la coda.

È anche interessante notare che l'80% delle organizzazioni culturali a partire dal primo lockdown ha iniziato a proporre contenuti culturali online, come visite guidate o laboratori educativi, affinando poi questo tipo di offerta anche una volta usciti dall'emergenza. Questo, nel tentativo di creare per l'utente un'esperienza estesa che possa accompagnare nel tempo e nello spazio i pubblici che non cercano una relazione mordi e fuggi, ma una possibilità di interazione ripetuta e non limitata al momento della visita fisica.

### Nuovi modelli di business

Così si è aperta la strada anche verso nuovi modelli di business e di revenue che fanno perno sull'esperienza estesa e sulle possibilità offerte dal digitale anche per raggiungere nuovi pubblici. Si pensi ad esempio agli NFT (i non fungible token), fenomeno sotto la lente di ingrandimento da un paio d'anni anche nel mondo dell'arte, le cui potenzialità in termini di creazione di community o come strumento per l'integrazione dell'offerta anche di altri attori del territorio, sono pressoché inesplorate nell'ambito culturale.

**Cionondimeno, le opportunità di innovazione sono molteplici anche negli ambiti più tradizionali del settore come la conservazione e il restauro.**

**Le tecnologie possono facilitare le operazioni di rinvenimento di reperti e siti archeologici:** solo a titolo di esempio, si pensi alla quantità di tempo e risorse che è possibile risparmiare individuando reperti nel sottosuolo mediante ispezioni non invasive con droni o con immagini satellitari rispetto alle tecniche di ispezione più tradizionali. Inoltre, esse permettono di espletare attività di manutenzione programmata mediante azioni preventive e monitoraggio dello stato del patrimonio in modo snello e rapido, aspetto particolarmente importante se si considera che la conservazione del

patrimonio è un'attività da concepire come continuativa e non una tantum. Le immagini satellitari consentono di monitorare il territorio a intervalli regolari, generando informazioni progressive sullo stato di conservazione, ad esempio, di un sito archeologico.

**Un ulteriore ambito in cui le tecnologie stanno progredendo rapidamente è quello della digitalizzazione delle opere; attività rilevante sia da un punto di vista di democratizzazione dell'accesso al patrimonio culturale che per fini più strettamente legati al monitoraggio, dal momento che la resa digitale di un'opera o di un reperto, se ripetuta regolarmente nel tempo, dà la possibilità anche di studiarne l'evoluzione e monitorarne i cambiamenti.**

Si tratta solo di alcuni dei vari ambiti applicativi in cui l'innovazione digitale può aiutare la conservazione e la valorizzazione del patrimonio, senza parlare delle numerose applicazioni che sono in grado di arricchire l'esperienza di visita, favorire l'immedesimazione e approfondire la conoscenza del patrimonio.

Ma è importante porre l'attenzione a due denominatori comuni che, da qualsiasi ambito l'innovazione si guardi, risultano ancora carenti nelle istituzioni culturali sebbene imprescindibili per la riuscita di un vero percorso di innovazione.

### L'approccio strategico e le competenze.

Sebbene da diversi anni l'Osservatorio richiami le istituzioni culturali a dotarsi di un piano dell'innovazione digitale, **le nostre indagini mostrano come negli ultimi tre anni sia rimasta invariata (ferma al 24%) la quota di musei, monumenti e aree archeologiche dotati di un piano dell'innovazione digitale.** È quindi evidente come le istituzioni necessitino di essere accompagnate in questo percorso. Con riferimento, ad esempio, alla digitalizzazione delle opere che sarà centrale nell'attività finanziata dal PNRR nei prossimi anni, sarà fondamentale chiedersi quali siano gli



obiettivi strategici del percorso che sarà intrapreso, in modo tale che questi guidino anche la selezione delle opere, delle metodologie e degli impieghi.

Il secondo ambito di lavoro fondamentale per il sistema è quello delle competenze. Secondo l'ultima rilevazione dell'Osservatorio, poco più di un'istituzione culturale su dieci ha un team dedicato all'innovazione digitale. Non è possibile attuare la trasformazione digitale senza figure professionali competenti e continuamente formate. Questo

è particolarmente vero ora che le attività digitali stanno aumentando in numero e rilevanza – a partire dalla presenza sui social, alla produzione di contenuti in formati anche digitali (realizzati dall'80% delle istituzioni), fino alla gestione delle attività di back-end - richiedendo supporto di personale qualificato e dedicato all'esplorazione dei modi in cui sia possibile creare valore attraverso contenuti e canali digitali in tutte le fasi del journey. **In molti casi la conoscenza delle tecnologie esistenti e disponibili**

**è estremamente utile anche per essere in grado di porre i giusti interrogativi e implementare quelle attività, iniziative, progetti che siano effettivamente in linea con gli obiettivi strategici dell'istituzione culturale.**

Il rischio, in assenza di competenze e di un piano strategico, è infatti quello di lasciarsi trasportare dalle tecnologie "in voga" dissipando risorse preziose in interventi di corto respiro e di scarsa visione.

### L'Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali

L'Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali nasce nel 2016 con l'intento di supportare il processo di adozione dell'innovazione digitale nelle istituzioni culturali e come luogo di incontro e confronto tra attori diversi dell'ecosistema culturale. In particolare, si pone come obiettivo l'introduzione nell'ecosistema culturale italiano di un luogo in grado di:

- Fornire una visione sistemica dell'innovazione digitale applicata ai processi di conservazione, valorizzazione, gestione, promozione, commercializzazione e fruizione del patrimonio, dei prodotti e servizi nel mercato dell'arte e della cultura, per facilitare l'upgrading dell'ecosistema culturale;
- Monitorare i trend digitali del settore;
- Facilitare l'allineamento tra domanda e offerta di innovazione attraverso tavoli di lavoro su tematiche specifiche;
- Sensibilizzare gli attori e i decisori verso una trasformazione digitale sostenibile.

La Ricerca 2021-2022 sull'innovazione digitale nel settore culturale si articola su quattro ambiti principali:

- Analisi dello stato di adozione e di diffusione di risorse digitali nelle istituzioni culturali: due indagini rivolte a i) musei, monumenti e aree archeologiche italiani ii) teatri italiani per comprendere lo stato dell'arte, l'andamento del mercato e l'impatto della pandemia sul comparto culturale;
- Indagine sui consumi culturali rivolta ai fruitori per indagare le caratteristiche e modalità di fruizione dei prodotti culturali al fine di fornire utili indicazioni alle istituzioni culturali;
- Censimento di startup attive in ambito turismo, turismo culturale e cultura per mappare le caratteristiche dell'offerta di servizi offerti a istituzioni culturali e fruitori da parte di startup innovative italiane e internazionali;
- Analisi della presenza sul web (siti, social media, etc.) delle istituzioni culturali italiane e della capacità di coinvolgimento degli utenti.

I risultati della ricerca sono frutto anche di un assiduo confronto con la Community di Partner, Sponsor e Istituzioni culturali con cui l'Osservatorio interagisce nel corso dell'anno in appuntamenti riservati e interviste. Per maggiori informazioni sulle attività e sulle possibili modalità di collaborazione contattare [francesca.cruciani@polimi.it](mailto:francesca.cruciani@polimi.it)

**Eleonora Lorenzini** è Direttrice dell'Osservatorio Innovazione Digitale nei Beni e Attività Culturali della School of Management del Politecnico di Milano, Eleonora Lorenzini collabora dal 2015 con gli Osservatori Digital Innovation del Politecnico di Milano, dove dirige anche gli Osservatori Innovazione Digitale nel Turismo e Business Travel. Dal 2004 si occupa di ricerca applicata e progetti di sviluppo negli ambiti del Turismo e della Cultura, svolgendo anche attività di docenza presso istituzioni universitarie e intervenendo in qualità di esperta in rilevanti eventi di settore nazionali e internazionali.

# Per una cultura digitale consapevole

Preservare, promuovere e condividere il patrimonio culturale per realizzare uno spazio pubblico, sociale e comunicativo, in grado di riaffermare con chiarezza il valore dell'essere Persone, dell'essere Cittadini, di essere e far parte, di quell'importante visione che è l'Europa, sono alcuni degli obiettivi dell'Associazione #DiCultHer. Obiettivi sottolineati nel *Manifesto Ventotene Digitale*<sup>1</sup> del 2017 come contributo all'Anno europeo del patrimonio culturale (2018) e ribaditi nel 2021 nell'anniversario degli 80 anni dal Progetto di Manifesto "Per un'Europa libera e unita" di Spinelli-Rossi.

DOI 10.12910/EAI2022-011



di Carmine Marinucci, Presidente Associazione internazionale #DiCultHer<sup>2</sup>

**P**reservare, promuovere e condividere il patrimonio culturale per riaffermare la ricchezza, la varietà e la molteplicità delle culture e dei "paesaggi sociali e culturali" nazionali ed europei nello sforzo di realizzare uno spazio pubblico, sociale e comunicativo, in grado di riaffermare con chiarezza il valore dell'essere Persone, il valore dell'essere Cittadini, il valore di essere e far parte di quell'importante visione che si chiama Europa sono alcuni degli obiettivi che l'Associazione #DiCultHer persegue. Obiettivi sottolineati nel *Manifesto Ventotene Digitale*<sup>3</sup> nato nel 2017 quale contributo #DiCultHer all'Anno europeo del patrimonio culturale (2018) e ribaditi nella sua revisione (2021) in occasione dell'anniversario degli ottanta anni dal Progetto di Manifesto "Per un'Europa libera e unita" di Spinelli-Rossi.

*Ripartire dalla cultura come bene comune e come condivisione "per ridisegnare la prospettiva di interventi*

*in direzione del rafforzamento dell'identità europea e del suo sviluppo sociale, nella vita, nel lavoro, nella condivisione dei valori comuni",* sono pertanto gli obiettivi perseguiti dall'Associazione attraverso un confronto attivo con le istituzioni partner, tra scuole, musei, associazioni, singoli individui, attraverso specifiche attività che hanno offerto l'occasione in particolare a giovani e loro docenti di esprimere e di immaginare strumenti concreti per vivere il patrimonio culturale **nel loro tempo** e per la co-creazione di un insieme di competenze digitali abilitate ad assicurare la conservazione, sostenibilità, valorizzazione e promozione del Digital Cultural Heritage, ma anche e soprattutto per favorire la *conoscenza approfondita dell'uso consapevole del Web, delle tecnologie ad esso collegate e degli strumenti e tecniche di comunicazione* rese disponibili dal digitale per una comunicazione eticamente efficace.

**Ripartire dalla cultura come bene comune e come condivisione**

Ripartire dalla cultura come bene comune e come condivisione è stato quindi il messaggio guida che identifica le istanze stesse che hanno portato all'elaborazione e realizzazione del progetto #DiCultHer sin dal 2015, ritenendo assolutamente prioritario per



i propri obiettivi offrire al Paese, e al mondo dell'istruzione in particolare, le proprie riflessioni nella consapevolezza che il coinvolgimento consapevole dei giovani e dei loro docenti sia prioritario per renderli protagonisti nei processi di costruzione identitaria e di cittadinanza attiva.

Restituire quindi ai giovani la consapevolezza di quanto sia importante riappropriarsi della titolarità partecipata della propria eredità culturale ripartendo proprio dal riconoscimento del valore della "Cultura Digitale". Cultura digitale per sostenere un uso profondo e innovativo della "cultura" come capacità di assumere e integrare punti di vista differenti sulla realtà, per produrre un pensiero critico e un impegno responsabile e adeguato a rispondere alle sfide della modernità e del post pandemia in particolare, che dobbiamo saper affrontare anche in relazione del nuovo Bauhaus Europeo che mostra la direzione per la transizione sostenibile dell'Europa.

Cultura digitale al centro della Nuova Agenda Europea della Cultura che per la prima volta assegna alla cultura un ruolo chiave nell'affrontare sfide sociali come la promozione della salute e del benessere, la coesione sociale e la promozione della diversità, l'innovazione socialmente sostenibile e l'educazione inclusiva.

**Cultura e digitale:** valenza strategica e di riferimento non solo nei programmi europei come Horizon Europe ma anche nelle politiche industriali europee e delle industrie culturali e creative: la cultura, il digitale non più solo uno "racconto", ma tra gli ecosistemi innovativi più strategici per il futuro dell'Europa; presupposto irrinunciabile per provvedere all'integrazione fra saperi umanistici tradizionali e conoscenze di metodi e tecniche computazionali nella strutturazione ed elaborazione di modelli formativi e educativi che puntino a creare conoscenze e competenze consapevoli trasversali, abilitate a partecipare attivamente ai processi di in-

novazione digitale e a generare quel *digital knowledge design system* necessario a un sistema educativo sostenibile, attraverso un processo che pone al centro la 'creatività' dei giovani per "garantire a tutte le studentesse e a tutti gli studenti le competenze chiave per affrontare i cambiamenti e le sfide del loro presente, per proiettarsi al meglio nel futuro, per diventare cittadine e cittadini attivi e consapevoli, capaci di condividere valori comuni e di confrontarsi positivamente con l'altro".

### Il Manifesto Ventotene Digitale. L'occasione digitale per la cultura e l'Europa (ed. 2021)

Con la recente revisione del Manifesto Ventotene Digitale promosso da #DiCultHer nel 2017 quale contributo di #DiCultHer all'anno europeo del Patrimonio culturale (2018), si è voluto sottolineare il ruolo del digitale nello sviluppo dell'Unione e, in questo senso, il Manifesto rappresenta il contributo di #DiCultHer e dei suoi partner alla nuova Europa. Per #DiCultHer, la revisione del Manifesto ha rappresentato e rappresenta, da una lato, un'occasione per far emergere le iniziative promosse dall'Associazione in materia di definizione e riconoscimento delle Culture Digitali come campi e identità cognitive per rafforzare la coesione sociale e promuovere la condivisione dei valori, dall'altro, anche una occasione per consolidare la diffusione di una cultura digitale omogenea e condivisa, fondata sulla conoscenza delle tecnologie digitali e delle sue criticità.

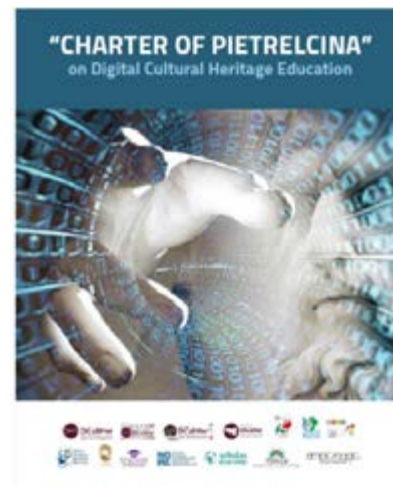
Nel Manifesto si propone di contribuire alla promozione e al sostegno di una cultura digitale come una delle fonti di conoscenza necessarie per i cittadini europei del presente e del futuro. Un nuovo insieme di competenze che garantiscano anche la conservazione, valorizzazione e promozione del patrimonio digitale e del patrimonio identitario anche ai fini della sua trasferibilità nelle nuo-

ve generazioni. Il documento lavora ad un piano di innovazione dell'educazione orientato sull'impegno della popolazione europea in fase di formazione che deve farsi carico oltre che dei propri territori anche della popolazione europea.

Tutte le fasi dell'istruzione richiedono ora una visione e progettazione sinergica dell'uso del digitale, perché il 'sapere' digitale sta offrendo occasioni di ri-configurazione complessiva delle entità e dei luoghi culturali come 'eredità e luoghi comuni'. Il digitale sta assumendo infatti valenza metodologica, strutturale e di contesto e la sua introduzione ha favorito e sta favorendo l'emergere di occasioni strategiche di riorganizzazione dei saperi, di apertura alle entità e ai contenuti, di accesso alle forme stesse del contemporaneo.

### La diversità come valore

In questo contesto, l'Associazione internazionale #DiCultHer, già con il documento di indirizzo della Carta di Pietrelcina per l'educazione all'eredità culturale<sup>3</sup>, frutto di ampia riflessione al suo interno, ha voluto mettere ulteriormente l'accento per riflettere sulle Digital Science, Humanities, Technology, Engineering, Arts and Mathematics (Digi-



tal SHTEAM) quale innovativo approccio valoriale necessario ai nostri giovani per acquisire le nuove conoscenze e competenze della contemporaneità: una sfida ben più ampia e strutturata di quella che il sentire comune sintetizza nell'uso critico della Rete, o nell'informatica. Una sfida da affrontare partendo da un'idea di ecosistema di conoscenze e competenze strutturate perché siano allineate alla rapidità evolutiva che caratterizza il Ventunesimo secolo, fatta di nuove alfabetizzazioni, ma soprattutto di conoscenze e competenze inter-, trans- e multidisciplinari da sviluppare e di creatività, con particolare attenzione al rafforzamento della produzione e comprensione di contenuti complessi e articolati anche all'interno dell'universo comunicativo digitale, nel quale oggi prevalgono ancora granularità e frammentazione.

Presupposti questi che all'interno dell'Associazione #DiCultHer sono ritenuti elementi prioritari progettuali su cui convergono le competenze sul tema della **diversità, come valore**. Come le teorie ecologiche ci insegnano, **la diversità è uno dei fattori fondamentali di resilienza dei sistemi ecologici** ed è quindi interpretabile come ricchezza e risorsa, se si abbattono le barriere e si sviluppano le interconnessioni, come potenziali elementi di crescita ed innovazione.

Una sfida tra creatività digitale, arte e Humanities e tra sviluppo sociale e lavoro, da affrontare favorendo l'introduzione al pensiero logico e computazionale e la familiarizzazione con gli aspetti operativi delle tecnologie informatiche quale naturale evoluzione indispensabile a favorire un approccio che pone alla base dell'innovazione la rimozione delle barriere disciplinari, per guidare l'attitudine al cambiamento verso la consapevolezza che il digitale, dopo esserne stato una formidabile leva, può diventarne il motore alimentato da un'energia realmente sostenibile: **la conoscenza**.

Un'azione culturale che parte da un'idea



rinnovata di “**spazi di apprendimento**”, intesi come agorà virtuali dell'innovazione e non unicamente come luogo fisico, piattaforme in cui sperimentare la riappropriazione di conoscenze e competenze digitali non più solo astratte, nelle quali studenti e docenti insieme possano sviluppare percorsi cognitivi condivisi e, quindi, favorire la reciproca condivisione di nuovi saperi. In questo paradigma, le metodologie e tecnologie digitali diventano abilitanti, quotidiane, “familiari”, strutturali al servizio di attività orientate alla formazione e all'apprendimento condiviso. Una sfida questa in grado di fornire alla società le chiavi di lettura del presente necessarie a creare la transizione verso il futuro, coerente ed anticipatrice della discussione in Europa per riguarda l'istruzione, la formazione, la parità di genere, le pari opportunità.

### **Futuro dell'Europa, nuovo Bauhaus europeo, Manifesto Ventotene digitale**

Nella visione dell'Associazione #DiCultHer, le attività di Educazione

finalizzate a riconoscere il digitale nel valore di eredità culturale e patrimonio culturale dell'inizio del nuovo millennio rappresentano, una opportunità per restituire ai nostri giovani la piena consapevolezza **del loro ruolo** nella modernità, essenziale nel raggiungere obiettivi di crescita sociale, culturale, economica.

In questo senso, un punto di partenza rilevante è rappresentato dalla proposta della Commissione al Parlamento europeo e al Consiglio di designare il 2018 come Anno europeo del patrimonio culturale che ha evidenziato il ruolo del Digital Cultural Heritage, assegnando allo stesso, colto nella sua molteplice e inesauribile varietà, un ruolo cruciale per il rilancio, anche economico, dell'Europa.

L'Anno europeo è stata l'occasione rilevante per segnalare l'importanza sociale ed economica del Patrimonio Culturale nell'identità europea e il suo valore nella vita, nel lavoro, nella condivisione dei valori comuni, nella convinzione che il Cultural Heritage favorisca e sostiene la coesione e l'integrazione sociale promuovendo la promozione del senso di appartenen-

za alla comunità.

**Il Cultural Heritage è anche il motore che collega memoria e innovazione, identità e progettualità delle comunità e dei cittadini e cresce arricchendosi del passato che si trasforma in presente e del futuro che diventa contemporaneo.**

In questo contesto, le rilevanti sfide che ci attendono come cittadini europei, come la crisi climatica, la creazione di economie verdi, la trasformazione digitale delle nostre società, ci autorizzano a porci la domanda: “Come possiamo assicurare collettivamente che i principi fondanti dell’integrazione (libertà, uguaglianza, rispetto dei diritti umani, stato di diritto e libertà di espressione, solidarietà, democrazia e lealtà fra gli Stati membri) restino rilevanti per il nostro futuro?”.

Le risposte e le indicazioni ci vengono dalla discussione innescata nell’ottobre 2020 dalla presidente della Commissione europea Ursula von der Leyen per un nuovo Bauhaus europeo e con la “Conferenza sul Futuro dell’Europa” avviata il 9 maggio 2021, Festa dell’Europa, nonché dall’intima consapevolezza “che sarebbe molto difficile per ciascuno di noi se fossimo da soli”.

Da soli anche nell’affrontare quelle carenze culturali di fondo che eludono i valori della conoscenza, delle competenze individuali, della ricerca, l’educazione, la cui importanza, invece, è stata ampiamente rimarcata sia nell’edizione 2017 del Manifesto “Ventotene Digitale”, sia nella sua revisione nel settembre 2021, e ribadita nella Carta di Pietrelcina per l’Educazione all’Eredità Culturale redatta nel 2019.

**Futuro dell’Europa, nuovo Bauhaus europeo, Manifesto Ventotene digitale, invito del Presidente Sergio Mattarella, insieme agli altri Capi di Stato dell’UE, in occasione della giornata dell’Europa del 9 maggio 2021 “ad unirsi alla discussione e a trovare insieme il percorso da segui-**

**re”,** rappresentano lo scenario culturale di riferimento di #DiCultHer ed in particolare sono stati gli obiettivi della sua programmazione delle attività per l’a.s. 2021-22 e gli obiettivi per riappropriarsi della titolarità partecipata all’Europa ripartendo dalla Cultura come bene comune, nello spirito della Convenzione di Faro.

Nello specifico tale programmazione, tiene conto dello sviluppo e la promozione di un sistema di azioni integrate per favorire l’educazione al patrimonio culturale digitale (“**global approach**”), attraverso una nuova proposta valoriale sul tema, orientata a connettere patrimoni materiali, immateriali, digitali e paesaggistici in quanto risorse inestimabili e strategiche per un’Europa sostenibile, nell’ottica di



**un nuovo Bauhaus** e per una pluralità di soggetti e comunità patrimoniali locali, nella visione della **Convenzione di Faro**, recentemente ratificata anche dall’Italia.

Tale **approccio collaborativo** si configura come strumento per rispondere e poter rilanciare mediante azioni concrete e significative quel *digital knowledge design system* applicato all’educazione al patrimonio culturale che mette al centro la ‘**creatività**’ dei giovani nella strutturazione della **nuova Cultura Digitale per innovare nell’educazione al patrimonio** e di intercettare allo stesso tempo le emergenze di settore “*come diritto individuale e collettivo e come impegno comune nell’elaborare una costruzione di senso intorno al patrimonio cultura-*

*le in grado di produrre consapevolezza dei significati e gestione sostenibile delle risorse*”.

**Patrimonio culturale come risorsa strategica per un’Europa sostenibile**

Sono questi i riferimenti culturali della “**Carta di Pietrelcina sull’educazione all’eredità culturale digitale**” elaborata da DiCultHer sul valore culturale delle nuove entità computazionali prodotte nell’**Era Digitale contemporanea** per dare identità al nuovo **Digital Cultural Heritage** definito dall’UE nell’Art. 2 delle Conclusioni del Consiglio del 21 maggio 2014 relative al **patrimonio culturale come risorsa strategica per un’Europa sostenibile** (2014/C 183/08).

Eredità Culturale ed inclusione sociale: quando il luogo culturale diventa luogo educativo, quando cioè tutte le categorie sociali (diverse per età, livello culturale, status sociale ed economico) riescono ad interagire proattivamente con esso e a sviluppare conoscenze e competenze, da tradursi in diritti individuali, la partecipazione alla comunità nonché l’uguaglianza di successo, perché “*l’inclusione accade non appena ha inizio il processo per la crescita della partecipazione*” (Booth e Ainscow 2008). L’Educazione all’Eredità Culturale Digitale e la Media Education diventano quindi componenti indispensabile delle conoscenze e competenze di cittadinanza globale e, avendo la loro valorizzazione nell’eredità materiale, immateriale e digitale, sono per loro natura multi-, trans- e interdisciplinare, fondata su metodologie condivise attive, e partecipative che richiedono forti sinergie tra i territori e le loro entità educative attraverso un reale coinvolgimento sia degli attori del sistema formativo istituzionale (scuola, università), sia di coloro che operano negli ambiti dell’apprendimento informale e della valorizzazione e conservazione del patrimonio culturale.

Dotare le nuove generazioni della conoscenza sia delle dimensioni e dei valori rinnovati assunti dell'Eredità Culturale tangibile e intangibile, sia del più vasto universo del nuovo Digital Cultural Heritage attraverso l'integrazione fra saperi umanistici tradizionali e conoscenze di metodi e tecniche computazionali nella strutturazione della nuova *Cultura Digitale*, è parte essenziale dell'impegno civile che #DiCultHer si è assunta per il futuro dei nostri ragazzi. Un futuro che pone al centro la loro 'creatività' per affrontare, mediante l'uso consapevole del digitale e con approcci innovativi, la conoscenza, l'accesso partecipato, la gestione, la presentazione, la fruizione, la conservazione e valorizzazione del Digital Cultural Heritage, per "garantire a tutte le studentesse e a tutti gli studenti le competenze chiave per affrontare i cambiamenti e le sfide del loro presente, per proiettarsi al meglio nel futuro, per diventare cittadine e cittadini attivi e consapevoli, capaci di condividere valori comuni e di confrontarsi positivamente con l'altro".

In questo senso, diritto all'istruzione, accesso alla cultura, sovranità culturale-epistemologica, sono istanze da cui generano principi quanto mai importanti e fondamentali, come quello della titolarità culturale esercitata con diritto e la "Presa in carico" di una responsabilità comune e condivisa rispetto a un bene comune, sia a ciò che ereditiamo dal passato, sia a ciò che abbiamo la possibilità di progettare e co-creare oggi nell'ambito degli ecosistemi culturali in cui viviamo, sperimentiamo ed esercitiamo, con la prospettiva di lasciare a nostra volta questa eredità a chi verrà dopo di noi.

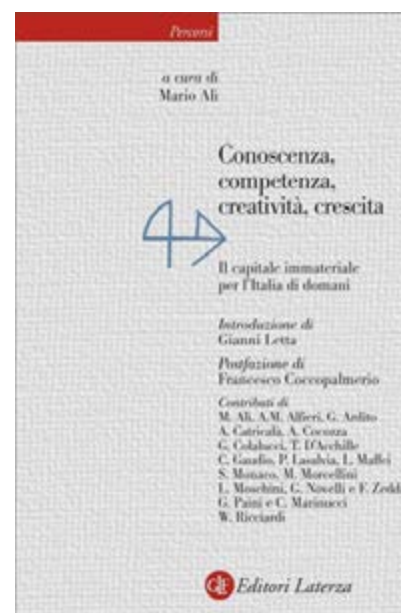
### La Convenzione di Faro

Sono questi principi significativi per la contestualizzazione della Convenzione di Faro al tempo che viviamo. La Convenzione di Faro (2005) ha

infatti innescato una profonda rivisitazione del concetto di Eredità Culturale legandola indissolubilmente alle comunità, e assume un ruolo cruciale laddove auspica un uso critico e consapevole dei canali e delle forme di espressività offerte dalle tecnologie digitali come veicolo di inclusione ampia. Ben oltre, quindi, il semplice utilizzo delle mere tecnologie in funzione abilitante ai fini della valorizzazione – ovvero come strumenti atti a favorire processi di semplice aggiornamento e digitalizzazione dell'esistente, il 'sapere' digitale offre occasioni di ri-configurazione complessiva delle entità e dei luoghi culturali come 'eredità comuni': il digitale assume valenza metodologica ed epistemologica, strutturale e di contesto.

Una sfida da affrontare insieme partendo da un'idea di ecosistema di conoscenze e competenze strutturate perché siano allineate alla rapidità evolutiva che caratterizza il Ventunesimo secolo, fatta di nuove alfabetizzazioni, ma soprattutto di conoscenze e competenze inter-, trans- e multidisciplinari da sviluppare e di creatività, con particolare attenzione al rafforzamento della produzione e comprensione di contenuti complessi e articolati.

In questa direzione, **governare e valorizzare la produzione e distribuzione di conoscenza, nonché la creatività digitale, è la sfida del nostro tempo.** Il sistema educativo e formativo ne sono al centro, nella ricerca di una mediazione tra la necessaria garanzia di qualità delle riflessioni, degli insegnamenti della produzione dei materiali didattici e l'altrettanto necessaria promozione della produzione collaborativa e della condivisione di contenuti, per dare ai nostri studenti le chiavi di lettura del futuro. Le competenze di "alfabetizzazione" sono oggi prerequisiti, ed è possibile avviarci in visione olistica ed interdisciplinare, sui nuovi paradigmi nella Digital Culture, che suggeriscono di procedere



alla sua co-creazione condivisa e partecipativa, strutturata in processi formativi articolati in *long life learning* intesi come implementazione di un insieme integrato di approcci scientifici, culturali e formativi, di processi, metodi e tecniche finalizzate alla costruzione di un sistema di competenze digitali consapevoli, abilitate alla gestione, co-creazione, salvaguardia, conservazione, sostenibilità, stabilità, trasferimento, accessibilità e valorizzazione dei dati e delle entità culturali digitali contemporanee e future.

### Costruire il futuro

Il futuro andrà costruito, passo dopo passo, perseguendo la saggezza implicita delle 4 C: Competenza, conoscenza, creatività e crescita (Mario Ali, Editori Laterza 2021) per dare nuovo impulso alla società della conoscenza partendo dalla nuova ricchezza delle Nazioni e cioè: il capitale "immateriale", il "capitale umano", le persone e la loro educazione e formazione.

In questa direzione, #DiCultHer ha avviato e sostanziato nel corso di questi ultimi anni una serie di iniziative ri-

volte al mondo dell'istruzione fondate, in particolare, sulla conoscenza dell'ecosistema digitale per la salvaguardia e la valorizzazione del patrimonio culturale e dei luoghi della cultura attraverso la 'creatività' dei giovani.

L'idea di fondo, è quella di **“un piano complessivo di innovazione dell'educazione e della valorizzazione del patrimonio”** nelle sue diverse forme e articolazioni: paesaggistico, artistico, culturale, etnoantropologico, ecc. centrato sull'engagement delle fasce giovani della popolazione per “farsi carico” dei territori, in attuazione della Convenzione di Faro, attraverso una visione e progettazione sinergica di attività nel campo del **digitale, della cultura, dell'educazione**, che **riconosce nella partecipazione studentesca il segno di una scuola moderna** e al digitale il suo autentico ruolo di facies culturale dell'epoca contemporanea per raccogliere la straordinaria eredità culturale e storica del nostro Paese e rimodellarla grazie alla creatività dei nostri ragazzi e al coinvolgimento delle «comunità patrimoniali», nello spirito della Convenzione di Faro.

### Protagonismo dei giovani

Per DiCultHer, il nodo centrale è rappresentato dal **protagonismo dei**

**giovani** tanto per valorizzarne le loro inclinazioni personali, quanto per fare in modo che si sentano *realmente titolari del patrimonio culturale e investiti della responsabilità che ne consegue per la tutela e la valorizzazione. Soprattutto per “garantire a tutte le studentesse e a tutti gli studenti le competenze chiave per affrontare i cambiamenti e le sfide del loro presente, per proiettarsi al meglio nel futuro, per diventare cittadine e cittadini attivi e consapevoli, capaci di condividere valori comuni e di confrontarsi positivamente con l'altro”*.

Alla luce delle esperienze pregresse, la programmazione delle attività per l'a.s. 2021-22, ha previsto un piano di azioni costituito da iniziative già sperimentate, di diverso livello e struttura ma orientate tutte alle nostre Comunità educanti per stimolare ulteriori riflessioni pedagogiche circa la necessità di **educare al patrimonio culturale** e per dare valore e senso alla realtà che ci circonda e per favorire lo sviluppo di processi cognitivi in grado di promuovere personalità creative e flessibili, aperte alla complessità. Nello specifico, il sopra citato piano di attività che sostanzia la programmazione per l'a.s. 2021-22, tiene conto della settimana **edizione della Settimana delle culture digitali Antonio Ruberti (9-15 maggio 2022)**, #HackCul-

**tura2022, l'hackathon degli studenti per la “titolarità culturale” finalizzato allo sviluppo di progetti digitali delle scuole italiane, per favorire nei giovani, in un'ottica di ‘titolarità culturale’, la conoscenza e la “presa in carico” del nostro patrimonio culturale** i cui risultati, per l'edizione in corso, saranno presentati nella **quarta edizione della Rassegna dei prodotti realizzati sui temi del DCH dalle scuole italiane (14-15 maggio 2022)**.

Una Rassegna per dare voce e attenzione al protagonismo del nostro sistema scolastico e ai nostri ragazzi che hanno raccolto le sfide sottese ad #HackCultura. Una Rassegna permanente sul Digital Cultural Heritage, quale appuntamento culturale ricorrente per il Paese e per l'Europa e **“comunità di pratica” “tra pari”** tra e con i giovani in apprendimento e i loro docenti, per sostenere il protagonismo delle Scuole e dei ragazzi nell'Era digitale, per garantire loro il diritto ad essere educati alla conoscenza e all'uso responsabile del digitale. Nonché della seconda edizione della Festa dell'Europa (9 Maggio 2022) coincidente peraltro con il primo giorno della Settima edizione della Settimana della Cultura Digitale Antonio Ruberti (9-15 Maggio 2022).

1. <https://www.diculther.it/wp-content/uploads/2021/09/MANIFESTO-Ventotene-Digitale-REV1-2021-07-09.pdf>
2. Due parole sull'associazione #DiCultHer. Nata nel marzo 2015, l'Associazione non ha finalità di lucro e in coerenza con il Codice del Terzo Settore persegue finalità della promozione della Cultura Digitale per concorrere alla formazione delle competenze nel settore del Digital Cultural Heritage e per garantire contesto e sviluppi attuativi al «diritto di ogni cittadino ad essere educato alla conoscenza e all'uso responsabile del digitale per la salvaguardia e la valorizzazione del patrimonio culturale e dei luoghi della cultura.
3. <https://www.diculther.it/wp-content/uploads/2021/09/MANIFESTO-Ventotene-Digitale-REV1-2021-07-09.pdf>
4. <https://www.diculther.it/blog/2020/01/01/carta-di-pietrelcina-sulleducazione-alleredita-culturale-digitale/>

# L'efficienza energetica per gli edifici storici

Gli edifici storici e di pregio non sono spesso adatti agli approcci standard di retrofitting. Pertanto, è necessario adottare un metodo più olistico, valorizzando la complessa interazione degli edifici, della loro collocazione geografica (zona climatica) e dei loro utenti come un unico sistema ed inserendo in maniera consistente soluzioni “tipo”, basate su ammodernamenti morbidi e il comportamento degli utenti, che comunque hanno dimostrato di avere un potenziale significativo per ridurre i consumi energetici e la CO<sub>2</sub>.

DOI 10.12910/EAI2022-012



di Ilaria Bertini, Direttrice del Dipartimento Unità Efficienza Energetica, ENEA

**L**a transizione, o meglio la “conversione” (trasformazione) energetica è prima di tutto un grande tema di trasformazione sociale e di comportamenti. Perché possa avere successo è necessario contare sulla forte motivazione di tutti i cittadini e di tutte le organizzazioni sociali e occorre considerare che i costi di questo percorso sono importanti e non sono solo economici. Nel medio e lungo termine i benefici delle azioni per ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici sono certamente superiori ai costi, ma nel breve periodo il peso di questa trasformazione è anche a carico dei cittadini e delle famiglie, di tutti coloro che si trovano ad affrontare maggiori costi o maggiori difficoltà nella vita quotidiana.

Il programma “Un'ondata di ristrutturazioni per l'Europa: inverdire gli edifici, creare posti di lavoro e migliorare la vita” lanciato dalla Commissione europea nell'ottobre 2020, definisce per il patrimonio edilizio esistente un'ambiziosa riduzione delle emissioni di gas serra del 60% al

**2030 e rappresenta l'azione centrale per la decarbonizzazione della nostra economia.** Inoltre, il programma ha come ulteriori obiettivi sia l'integrazione e la promozione di azioni per l'economia circolare del settore edilizio, ricollegandosi specificamente al nuovo Piano d'azione europeo per l'economia circolare, sia la creazione di un ponte tra il mondo della scienza e della tecnologia con il mondo dell'arte e della cultura, attraverso la nascita di un movimento intitolato a una Nuova Bauhaus europea.

Il successo delle iniziative che si intendranno prendere per proseguire nel percorso della decarbonizzazione sarà determinato anche dalla capacità di creare sinergie per coprire aspetti tecnici, socio-economici, ambientali, di elaborazione di dati e della comunicazione, mi sento di sintetizzare quanto detto in tre parole:

- **tecnologia:** ruolo prioritario di ricerca, innovazione e competitività;
- **formazione:** valorizzazione del-

la dimensione culturale e sociale con particolare attenzione ai temi dell'inclusione, occupazione, equità e delle pari opportunità;

- **governance:** sinergia tra le istituzioni e le imprese, tra crescita economica e sostenibilità ambientale.

## La riqualificazione del settore edilizio esistente

La riqualificazione del settore edilizio esistente è un tema di assoluta centralità nella prospettiva della transizione, oltre ad essere una forza trainante per l'economia, l'occupazione, l'innovazione tecnologica, la trasformazione delle città, la risposta ai temi sociali del disagio abitativo e della povertà ed al miglioramento dello stato di salute della popolazione. Quasi il 50% del consumo dell'energia finale dell'Unione è usato per riscaldamento e rinfrescamento, di cui l'80 % negli edifici.

Per superare, dunque, gli inevitabili





ostacoli in questa programmazione le parole, **sostenere, agevolare, semplificare** sembrano le più adatte per declinare in Italia le necessarie azioni per raggiungere un patrimonio immobiliare (pubblico e privato) decarbonizzato.

Sul piano legislativo interno, la strada nel nostro Paese è stata tracciata da una serie di misure: detrazioni fiscali, conto termico, PREPAC (il Programma di Riqualificazione Energetica della Pubblica Amministrazione Centrale), Fondo Nazionale per l'efficienza energetica, programma di interventi promossi dalle politiche di coesione.

Tali misure di sostegno agli investimenti nel settore civile presentano gradi diversi di complessità degli interventi, di procedure di accesso, di soggetti coinvolti, oltre a differenziazioni dei potenziali beneficiari.

Parallelamente è stata aggiornata la strategia nazionale per la riqualificazione energetica degli edifici (STREPIN), che ridefinisce gli obiettivi delle loro prestazioni attraverso:

- l'introduzione di nuovi materiali e

nuove tecnologie in ambito domestico;

- l'adozione di nuovi standard costruttivi e di dispositivi di uso finale;
- l'efficientamento dell'involucro edilizio;
- la maggiore diffusione di riqualificazioni profonde del parco immobiliare esistente, oltre che a una maggiore diffusione delle rinnovabili termiche e del teleriscaldamento.

#### Il "cambiamento comportamentale"

Accanto a questi concetti vorrei sottolineare un altro aspetto che avrà un impatto fondamentale nel conseguimento della Transizione energetica, il "cambiamento comportamentale". Gli aspetti relativi all'impatto sociale delle scelte sono centrali per la questione energetica, come anche quelli relativi al modo di comunicare le informazioni, alla strategia di comunicazione che si sceglierà ed alla distanza tra decisori e comunità. In questo framework, la promozione dell'efficienza energetica e, quindi, della sostenibilità

energetica richiede una elaborazione di scenari e visioni nonché la modificazione di stili di vita individuali e collettivi.

In questo senso, il Dipartimento Unità Efficienza Energetica (DUEE) dell'ENEA, già da qualche anno, è impegnato in attività di studio per approfondire quali gli indicatori e gli strumenti più adatti per agire in questo settore così importante per portare a compimento l'obiettivo della decarbonizzazione.

La normativa in materia energetica, in continua evoluzione, si è fatta molto stringente in questi ultimi anni e, come diretta conseguenza, gli edifici di nuova costruzione sono energeticamente efficienti e spesso ricorrono a fonti energetiche rinnovabili. Tuttavia, le nuove costruzioni vanno progressivamente riducendosi e l'attenzione è rivolta prioritariamente al patrimonio edilizio esistente. Le risorse ambientali già sfruttate per lo sviluppo degli edifici esistenti e delle infrastrutture urbane includono sia i materiali stessi che i combustibili utilizzati nella loro estrazione,

produzione, trasporto e costruzione: la loro "energia incorporata".

**Questo investimento fornisce al settore della conservazione e del retrofit degli edifici un ruolo vitale nelle agende globali di oggi che va oltre il focus sull'interesse architettonico o storico.** L'importanza della conservazione di questa risorsa incorporata è sottolineata dalla stima che l'80% degli edifici che esisteranno nel 2050 sono già stati costruiti e la comprensione dei requisiti di sostenibilità offre una grande opportunità per il settore del patrimonio di espandere il proprio campo di attività e influenza di concerto con il settore del retrofit tradizionale.

Per ciò che riguarda la riqualificazione energetica degli edifici del '900, le prescrizioni e i requisiti imposti sono chiari, per quanto attiene invece gli edifici storici, oggetto di vincoli architettonici, la prassi è stata condotta facendo quasi esclusivamente riferimento al concetto di "deroga".

Sebbene la riduzione dei consumi energetici sia fondamentale per tutte le tipologie di edifici, tuttavia la conservazione di un patrimonio edilizio, attraverso il restauro, non ammette trasformazioni che possono alterarne i caratteri originari.

**Gli edifici storici e di pregio non sono spesso adatti agli approcci standard di retrofitting.** Pertanto, è necessario adottare un metodo più olistico alla riqualificazione degli edifici storici, valorizzando la complessa interazione degli edifici, della loro collocazione geografica (zona climatica) e dei loro utenti come un unico sistema ed inserendo

in maniera consistente soluzioni "tipo", basate su ammodernamenti morbidi e il comportamento degli utenti, che comunque hanno dimostrato di avere un potenziale significativo per ridurre i consumi energetici e la CO<sub>2</sub>.

### Barriere non tecnologiche

È noto che esistono rilevanti barriere non tecnologiche che ostacolano gli interventi di riqualificazione energetica di tutti gli edifici. Tali barriere diventano ancora più impattanti nel caso dei beni culturali a causa:

- della mancanza di fiducia dei decisori nell'adozione di soluzioni tecniche a causa dei requisiti della legislazione sulla prestazione energetica;
- della mancanza di supporto e guida nel processo di progettazione del retrofit di edifici storici, spesso troppo complessi per professionisti e titolari non specializzati;
- della mancanza di coinvolgimento degli utenti in l'adeguamento di edifici storici a causa della ridotta redditività economica;
- l'accesso limitato a best practices di riqualificazioni compatibili con la conservazione in grado di garantire la compatibilità del patrimonio e prestazioni a lungo termine.

Proprio a tale proposito intendo ribadire che la **diagnosi energetica<sup>1-2</sup> dell'edificio è lo strumento prioritario e indispensabile per evidenziare tutte le sue caratteristiche funzionali**, che ci permette di evidenziarne i punti di

forza, da conservare e valorizzare, e i punti di debolezza che andranno rafforzati con interventi scelti ad hoc fra le diverse soluzioni impiantistiche e di materiali che il mercato può offrire grazie allo sfruttamento dei continui progressi tecnologici.

Desidero, inoltre, evidenziare che **la consapevolezza e il comportamento dell'utente, come la scelta della temperatura, il riscaldamento a zone e l'aerazione controllata, hanno un effetto significativo sulla domanda di energia senza alcun impatto diretto sull'edificio.**

Pertanto, nel caso specifico della riqualificazione energetica degli edifici di pregio, questo aspetto dovrebbe essere maggiormente valorizzato rispetto a quanto generalmente si tenda a fare, proponendo progetti basati più sulle soluzioni tecniche che sulle prospettive degli utenti dal basso verso l'alto.

**L'efficienza energetica gestita dal comportamento degli utenti può essere un elemento determinante per favorire interventi meno invasivi negli edifici storici.**

Il dipartimento DUEE ha svolto molti studi, anche in collaborazione con ricercatori di Università italiane, proprio allo scopo di definire metodologie per la definizione di interventi riqualificazione energetica di edifici storici e di pregio, produrre linee guida per la stesura di capitolati tecnici, eseguire e raccogliere casi studi da rendere disponibili attraverso i propri canali ufficiali<sup>3</sup>.

1. LINEE GUIDA alla presentazione dei progetti per il Programma per la Riqualificazione Energetica degli edifici della Pubblica Amministrazione Centrale PREPAC (D.M. 16 Settembre 2016 ), redatto aa ENEA (<https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/linee-guida-alla-presentazione-dei-progetti-per-il-programma-per-la-riqualificazione-energetica-degli-edifici-della-pubblica-amministrazione-centrale-prepac.html>).
2. Norma UNI1604716 "Diagnosi energetiche – Linee guida per le diagnosi energetiche degli edifici" costituisce una linea guida per l'applicazione della UNI CEI EN 16247-2 sulle diagnosi energetiche degli edifici e per l'esecuzione delle diagnosi energetiche degli edifici (ad uso residenziale, terziario o altri assimilabili).
3. M. Morandotti, D. Besana, M. Pia Riccardi, B. Messiga, V. Cinieri, E. Basso, M. Malagodi, V. Guidetti, R. Avagliano, M. Grandi, S. Olivero, F. Stirano, D. D. Donfrancesco, R. SabbatelliStudio, sviluppo e definizione di linee guida per interventi di miglioramento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio e per la gestione efficiente del sistema edificio-impianto, rapporto tecnico RdS/2011/63.

# Il Knowledge Exchange Program dell'ENEA per i beni culturali

L'ENEA può mettere in campo numerose tecnologie in modalità “*knowledge transfer*”, per la tutela, il restauro e la valorizzazione del Patrimonio Culturale del nostro Paese, con applicazioni che vanno dalla diagnostica per immagini, alla caratterizzazione dei materiali, passando per ricostruzioni e scansioni 3D, fino ad arrivare alla diagnosi di problematiche strutturali, all'utilizzo di sensoristica innovativa e alla mappatura /prevenzione di rischi.

DOI 10.12910/EAI2022-013



di Marco Casagni, Responsabile Divisione Sviluppo Tecnologico, ENEA

**Q**uando alcuni anni fa, prima della pandemia, è stato ideato il Knowledge Exchange Program (KEP, [www.kep.enea.it](http://www.kep.enea.it)) – il programma dell'ENEA per intensificare le relazioni e consolidare partnership di medio-lungo termine con il sistema produttivo attraverso processi di trasferimento tecnologico in una prospettiva di *open-innovation* - non abbiamo avuto alcun dubbio: le tecnologie per i Beni Culturali avrebbero fatto senz'altro parte del programma delle tematiche strategiche e beneficiato dei servizi offerti dal KEP, tenuto conto dell'interesse per l'offerta dell'ENEA da parte di imprese del settore e la loro trasversalità rispetto alle competenze verticali dei singoli Dipartimenti. Oggi, infatti, tra le sei tematiche portanti individuate, il KEP promuove l'offerta, tra le altre, di soluzioni innovative per la valorizzazione e la promozione del Patrimonio Culturale - anche attraverso l'applicazione di tecnologie ICT come la realtà virtuale e aumentata, i

big data, la digitalizzazione e l'utilizzo di tecnologie per attività di diagnosi, restauro, conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale, con l'obiettivo ultimo di preservare e allargare la platea dei soggetti destinati alla loro fruizione. Sono infatti numerose le tecnologie che l'ENEA può mettere in campo, in modalità “*knowledge transfer*”, per la tutela, il restauro e la valorizzazione del Patrimonio Culturale del nostro Paese, con applicazioni che vanno dalla diagnostica per immagini (magari originate nell'ambito della ricerca sul nucleare), alla caratterizzazione dei materiali, passando per ricostruzioni e scansioni 3D, fino ad arrivare alla diagnosi di problematiche strutturali, all'utilizzo di sensoristica innovativa e alla mappatura /prevenzione di rischi.

## Difficoltà e ostacoli

Ma non sono tutte rose e fiori...nel senso che il settore del Patrimonio Culturale, nonostante l'importanza evidente

che esso riveste per il “Bel Paese”, soffre di alcune oggettive difficoltà che ostacolano la creazione di un rapporto stretto e funzionale tra la ricerca pubblica e le imprese che in esso operano o avrebbero l'ambizione di operare. Innanzitutto la ridotta dimensione imprenditoriale di molti dei soggetti attivi in questo settore e la scarsa domanda di soluzioni innovative da parte della committenza cui afferisce il bene culturale all'atto dell'emissione dei bandi per l'assegnazione degli interventi, a vantaggio di soluzioni standard già nella disponibilità delle imprese potenzialmente interessate.<sup>1</sup>

A ciò occorre aggiungere il fatto che il privato che vuole avere un ruolo nel campo dei Beni Culturali deve adeguarsi e condividere regole e vincoli particolari e accettare di dover spesso rinunciare a profitti immediati e avere margini spesso limitati<sup>2</sup>.

Con queste premesse non sorprende dunque che tra le imprese che hanno aderito al KEP (attualmente oltre 250)



siano poco più del 6%, la minoranza, quelle che hanno individuato la tematica delle Tecnologie per i Beni Culturali (TCH) come quella di maggior interesse tra le sei presenti nel portale (sono complessivamente circa il 16% le imprese che hanno comunque identificato la tematica THC come di proprio interesse).

### Il ruolo del PNRR

Naturalmente, per il futuro, molte aspettative sono riposte, per quanto riguarda il settore dei Beni Culturali, sul Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) che assegna alla Componente 3 – Turismo e Cultura 4.0 della Missione 1 – Digitalizzazione, Innovazione,

Competitività, Cultura e Turismo, risorse per oltre sei miliardi e mezzo di euro destinati “ad incentivare i processi di *upskilling e reskilling* degli operatori culturali su tematiche di digitalizzazione ed ecologia, e a sostenere l’evoluzione dell’industria culturale e creativa 4.0, con l’obiettivo di organizzare e conservare il patrimonio culturale italiano, favorendo la nascita di nuovi servizi culturali digitali e ponendo le basi per la creazione di elementi innovativi per l’ecosistema del turismo italiano”.

Poiché il PNRR prevede che gli “interventi di riqualificazione/rinnovamento dell’offerta siano improntati a una filosofia di sostenibilità ambientale e pieno sfruttamento delle potenzialità del digitale, facendo leva sulle nuove tec-

nologie per offrire nuovi servizi e migliorare l’accesso alle risorse turistiche/culturali”, ENEA è in prima fila per mettere a disposizione le competenze dei propri ricercatori e tecnologi, le dotazioni dei propri laboratori e le innovative tecnologie di cui dispone, di tutti quegli operatori, pubblici e privati, che vorranno proporre iniziative progettuali volte alla modernizzazione delle infrastrutture materiali e immateriali del patrimonio artistico nazionale, a migliorare la sicurezza sismica e la conservazione delle opere d’arte e a supportare la transizione digitale ed ecologica, in un settore così cruciale e rilevante per il nostro Paese.

1. Andrea Cuccia – Il trasferimento tecnologico a supporto della tutela e della valorizzazione del patrimonio culturale. Analisi dello stato dell’arte in Sicilia e possibili linee di sviluppo- XLII Conferenza Italiana di Scienze Regionali, 2021
2. Pietro Folena – I beni culturali tra retorica e modernità – Energia, Ambiente e Innovazione, 4/2016

# Le potenzialità delle diagnostiche ottiche e spettroscopiche per i beni culturali

Le diagnostiche ottiche e spettroscopiche, punto di eccellenza della divisione Tecnologie Fisiche per la sicurezza e la salute, offrono possibilità uniche di caratterizzazione di superfici in modalità non distruttiva o micro-distruttiva, con molteplici applicazioni in varie discipline. In particolare, le diagnostiche laser in situ e remote sono un esempio virtuoso di *cross fertilization* fra le applicazioni della ricerca in ambito nucleare e quelle per la tutela, conservazione, conoscenza e valorizzazione del patrimonio culturale.

DOI 10.12910/EAI2022-014



di Alessandro Dodaro, Direttore del Dipartimento Fusione e Sicurezza Nucleare, ENEA

**L**e attività del dipartimento FSN sono focalizzate su Fusione e Sicurezza Nucleare, con l'obiettivo di sviluppare al suo interno anche le diagnostiche di cui necessita. **Le diagnostiche ottiche e spettroscopiche, punto di eccellenza della divisione Tecnologie Fisiche per la sicurezza e la salute, offrono possibilità uniche di caratterizzazione di superfici in modalità non distruttiva o micro-distruttiva con molteplici applicazioni in varie discipline.** Un gruppo significativo di queste è relativo alla caratterizzazione di materiali per uso in presenza di radiazioni, sia in reattori a fissione che a fusione. Tecnologie e metodologie originariamente sviluppate in tale ambito [1] possono essere facilmente adattate a problematiche analoghe in diversi settori, dall'aerospaziale ai **beni culturali**, in quest'ultimo caso sono privilegiate le funzioni di utilizzo in-situ e remoto finalizzate

alla conservazione preventiva e al restauro di superfici. Altre applicazioni sono legate più in generale alle tematiche di Security CBRNe e alla protezione del territorio.

Lo sviluppo di laser scanner veloci, iniziato presso il centro ENEA di Frascati con il sistema IVVS (in-vessel viewing systems) per il monitoraggio delle superfici interne di reattori a fusione [2], ha portato alla realizzazione di sistemi ITR (Image Topological Radar) operanti ad alta risoluzione (millimetrica o sub millimetrica) fino ad oltre 30 m in aria, aggiungendo la capacità di colorimetria remota (RGB-ITR) a quella di analisi morfologica della superficie. L'alta risoluzione è stata ottenuta con la doppia modulazione di ampiezza, mentre l'imaging monocromatico è stato effettuato a singolo laser o con una combinazione ottica di tre lunghezze d'onda laser nel visibile [3]. Gli apparati

realizzati ed utilizzati sull'esperimento FTU (Frascati Tokamak Upgrade) e su superfici monumentali sono mostrati in figura 1, assieme ad un esempio di ricostruzione d'immagine.

Una particolare variante del sistema ITR monocromatico è risultata adatta ad indagini in acqua (Underwater-ITR), specializzando il prototipo per archeologia sottomarina, con operazione a singolo laser sul picco di trasmissione del segnale visibile in acqua (blue-verde secondo la trasparenza della medesima che consente misure fino a circa 15 m di distanza). Il payload U-ITR è stato realizzato per operazione da veicolo sottomarino filoguidato (ROV) operato dalla nave appoggio. **In questo caso, l'esperienza maturata per i Beni Culturali è tornata utile all'applicazione di sicurezza nucleare per la messa a punto di payload im-**



Fig. 1 In alto a sn il prototipo di IVVS realizzato per il monitoraggio dell'erosione delle piastrelle all'interno di FTU; a dx il modello 3D raccolto. In basso a sinistra il sistema RGB-ITR, a destra un particolare della volta di Pietro da Cortona scansionata ad alta risoluzione a 18 m da terra.

merso nella piscina del reattore di fissione sperimentale TRIGA (che si trova presso il Centro di ricerche ENEA della Casaccia), con lo scopo di monitorare la posizione delle barre di combustibile, per le quali risulterebbe critico un disallineamento originato da un evento catastrofico (es. terremoto) [4].

#### Lo sviluppo e l'applicazione dei sensori laser spettroscopici

Per lo sviluppo e l'applicazione dei sensori laser spettroscopici sono stati fondamentali due step: la miniaturizzazione delle sorgenti laser e la disponibilità di rivelatori per imaging spettroscopico ICCD sempre più sensibili, rendendone possibile l'uso sia in situ che remoto. L'applicazione remota della caratterizzazione analitica di superfici è stata realizzata nell'ambito di un progetto di Security a Frascati con sistema ILS (Integrated Laser System) capace di effettuare caratterizzazioni laser spettroscopiche di superfici mediante le tecniche Laser Raman, Laser Induced Fluorescence e Laser Induced Breakdown Spectroscopy.

In particolare, la LIBS è d'interesse per le sue capacità di stratigrafia sia nella caratterizzazione di superfici di beni culturali che in quella degli isotopi assorbiti sulla superficie delle Plasma Facing Components all'interno dei reattori di fusione. In sistema ILS è stato applicato con successo alla stratigrafia remota di ceramiche (esaminate alla distanza di 10 m) [5], mentre un suo derivato miniaturizzato, dedicato esclusivamente alla LIBS, è stato poi progettato ed allestito per operazione tramite un braccio robotico all'interno di FTU durante le operazioni di manutenzione [6]. Gli apparati realizzati e un esempio della rispettiva applicazione sono mostrati in Figura 2.

Sistemi spettroscopici per imaging remoto di fluorescenza, sia risolto in lunghezza d'onda che in tempo, sono stati sviluppati da oltre un decennio per ap-

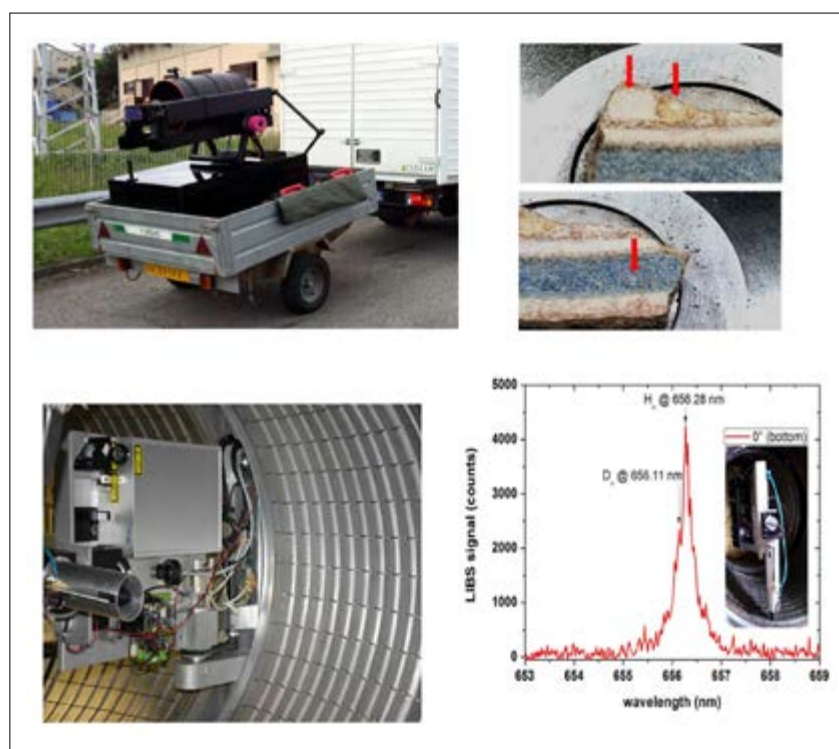


Fig. 2 In alto a sn il prototipo ILS in una dimostrazione sul campo per la rivelazione remota di tracce di esplosivi. In basso a sinistra il prototipo su un braccio robotico operante all'interno di FTU; a destra lo spettro ad alta risoluzione degli isotopi dell'idrogeno adsorbiti sulle mattonelle nella zona del divertore.

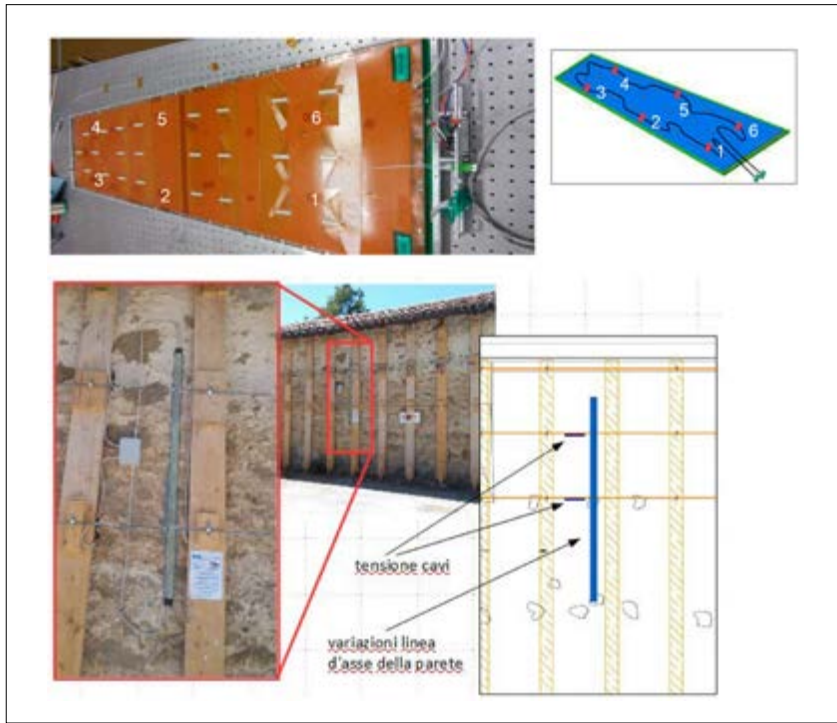


Fig. 3 In alto a sn sensori in fibra ottica FBG per la protezione di rivelatori di muoni nell'esperimento CMS (compact muon solenoid) presso il CERN; a destra lo schema di connessione del sistema distribuito dei 6 sensori FBG collegati in serie per monitorare in real-time la temperatura di componenti critici del rivelatore. In basso il sistema installato sulle opere provvisorie di sostegno alla Chiesetta di Santa Maria delle Grazie di Accumoli dopo il terremoto del 2016, con lo schema di funzionamento che ne evidenzia la sensibilità a diverse piccole variazioni in conseguenza di scosse di assestamento.

plicazioni ai beni culturali [7] con particolare riguardo alla possibilità di evidenziare tracce di restauri con materiali moderni e presenza di biodegrado.

La sensibilità di questi sistemi alle sostanze organiche polimeriche (plastiche di vario tipo) ne ha suggerito l'applica-

zione anche per indagini su larga scala per la Security per evidenziare le tracce di esplosivi improvvisati in scenari di post- esplosione [8]. In questo caso è stata privilegiata la velocità di acquisizione dati ed è stato realizzato un sistema rapido di imaging con eccitazione

laser UV e rivelazione lunghezze d'onda prefissate nel UV vicino e nel visibile (caratteristiche di varie tipologie di materiali). Il sistema è stato successivamente applicato con successo anche per la caratterizzazione di materiali lapidei (marmi) nei Beni Culturali, che presentano emissioni diverse nelle finestre spettrali prescelte [9].

**Sistemi di monitoraggio formati da catene di sensori in fibra ottica**

Anche sistemi di monitoraggio formati da catene di sensori in fibra ottica, basati su reticoli di Bragg a lettura laser, che consentono di monitorare sia piccoli spostamenti che variazioni di temperatura, hanno trovato nel dipartimento uno sviluppo in campo nucleare ed applicazioni significative per la tutela dei beni culturali, soprattutto in situazioni che richiedano un'efficace prevenzione sismica. Sulla base di una precedente esperienza maturata in un pluriennale collaborazione con il CERN, questi sensori sono stati adattati all'utilizzo su grandi impianti di fisica nucleare, e la loro installazione è prevista sulle nuove macchine a Frascati (dall'acceleratore TOP IMPLART al DTT)<sup>1</sup> per il controllo fine dell'allineamento di componenti interni. Nell'ambito dei beni culturali i sensori sono stati prevalentemente utilizzati in campagne di monitoraggio di opere monumentali in zone sismiche. Una coppia di esempi sono mostrati nella figura 3.

**BIBLIOGRAFIA**

1. R. Fantoni, S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, M. Ferri De Collibus, L. De Dominicis, M. Francucci, M. Guarneri, V. Lazic, A. Palucci "In situ and remote laser diagnostics for material characterization from plasma facing components to Cultural Heritage surfaces" *J. of Instrumentation* 14 (2019) C07004.
2. L. Bartolini, A. Bordone, A. Coletti, M. Ferri De Collibus, G.G. Fornetti, S. Lupini, C. Neri, M. Riva, L. Semeraro, C. Talarico 1998 "Amplitude modulated laser in vessel viewing system (LIVVS) for ITER/JET," *Fusion Technology*, 1, 685-688.
3. Fantoni R., Almaviva S., Caneve L., Caponero M., Colao F., De Collibus M.F., Fiorani L., Fornetti G., Francucci M., Guarneri M., Lazic V., Palucci A., Spizzichino V. 2017. "Laser scanners for remote diagnostic and virtual fruition of cultural heritage". *Optical and Quantum Electronics* 49, Article 120.
4. L. De Dominicis, M. Carta, M. Ciaffi, L. Falconi, M. Ferri de Collibus, M. Francucci, M. Guarneri, M. Nuvoli, and F. Pollastrone. "Radiation Tolerant 3D Laser Scanner for Structural Inspections in Nuclear Reactor Vessels and Fuel Storage Pools" *Science and Technology in Nuclear Installations*, 2021, Vol. 2021. Article ID 8237946 <https://doi.org/10.1155/2021/8237946>
5. Lazic V., Trujillo-Vazquez A., Sobral H., Márquez C., Palucci A., Ciaffi M., Pistilli M.. "Corrections for variable plasma parameters in laser induced breakdown spectroscopy: Application on archeological samples" *Spectrochim. Acta B* 122, 103–113, (2016).
6. G. Maddaluno, S. Almaviva, L. Caneve, F. Colao, V. Lazic, L. Laguardia, P. Gasior, M. Kubkowska, and the FTU team. Detection by LIBS of the deuterium retained in the FTU toroidal limiter. *Nucl. Mater En.* 18 (2019) 208–211.
7. Fantoni R., Caneve L., Colao F., Fiorani L., Palucci A., Dell'Erba R., Fassina V.. "Laser-induced fluorescence study of medieval frescoes by Giusto de' Menabuoi" *J. Cult. Herit.* 14, S59–S65, (2013).
8. Caneve L., Colao F., Del Franco M., Palucci A., Pistilli M., Spizzichino V. 2016 "Multispectral imaging system based on laser-induced fluorescence for security applications" *Proc. SPIE 9995, Optics and Photonics for Counterterrorism, Crime Fighting, and Defence XII*, 999509 (doi: 10.1117/12.2240924).
9. Spizzichino, V., Bertani, L., Caneve, L. 2018 "Origin Determination of Mediterranean Marbles by Laser Induced Fluorescence". *Lecture Notes in Computer Science* 11196 LNCS, pp. 212-223.
10. M. Caponero et al., "Two years' test of a temperature sensing system based on fibre Bragg grating technology for the CMS GE1/1 detectors" *Journal of Physics: Conference Series*, 1561(2020), 012006. doi: 10.1088/1742-6596/1561/1/012006.
11. Caponero, M.A., Dell'Erba, D., Kropp, C. "Use of fibre optic sensors for structural monitoring of temporary emergency reinforcement of the church S. Maria delle Grazie in Accumoli" *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9(2019), pp353–360. doi: 10.1007/s13349-019-00335-w.

1. TOP IMPLART (Terapia Oncologica con Protoni – Intensity Modulated Proton Linear Accelerator for RadioTherapy), è un acceleratore lineare per la protonterapia per la cura di alcune patologie tumorali, in via di realizzazione presso il centro di ricerche ENEA di Frascati. DTT è il Divertor Tokamak Test, una macchina sperimentale in costruzione presso il Centro di ricerche ENEA di Frascati, per la sperimentazione sulla fusione nucleare



# Promuovere l'innovazione presso gli stakeholder

Per arrivare ad una convergenza fra stakeholder e sviluppatori di tecnologie per i beni culturali è necessario che i primi siano convinti della necessità di utilizzare ciò che può essere fornito dai secondi in termini di innovazione, in quanto solo questo permetterà loro di risolvere significativi problemi di conservazione. ENEA è impegnata in diversi progetti per promuovere l'innovazione relativa a tecnologie di propria competenza per renderle il più possibile appetibili agli stakeholder del settore.

DOI 10.12910/EAI2022-015



di Roberta Fantoni, Responsabile Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute, ENEA

**L**a conservazione e valorizzazione dei beni culturali è stata inclusa dalla regione Lazio fra le tematiche di Smart Specialization Strategies (SSS3) da sviluppare promuovendo innovazione tecnologica. ENEA con il progetto regionale “Sviluppo e diffusione di metodi, tecnologie e strumenti avanzati per la COservazione dei Beni culturali, basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti - COBRA” (cobra.enea.it), finanziato dal luglio 2015 al dicembre 2017, ha recepito questa finalità impegnandosi a promuovere l'innovazione relativa a tecnologie di propria competenza per renderle il più possibile appetibili agli stakeholder operanti nel settore.

Allo scopo ha anche effettuato una serie di incontri con gli stakeholder usando per la prima volta in questo campo lo strumento dei focus group, che ha portato allo stesso tavolo gli esperti di tecnologia, i gestori dei beni

culturali e i conservatori operanti con metodologie tradizionali. I risultati degli incontri si sono aggiornati nella realizzazione di 11 prototipi il più possibile rispondenti ai bisogni degli stakeholder, che sono stati dimostrati in 21 siti di intervento regionale.

Le attività di ENEA nei settori di competenza sono poi proseguite nell'ambito dei progetti della prima fase (luglio 2018 – gennaio 2020) del Centro di Eccellenza del Distretto Tecnologie per la Cultura della regione Lazio (CoE del DTC Lazio) con l'adesione dell'Agenzia come socio fondatore all'omonima Associazione. In tale ambito ENEA ha infatti partecipato ai progetti “ECOsistema Digitale – ECODIGIT” e “Tecnologie per il miglioramento della Sicurezza e la ricostruzione dei centri Storici in area sisMIca – SISMI” mentre ha coordinato il progetto “Tecnologie di Analisi, DiAgnostica e MOnitoreggio per la conservazione e il re-



Fig. 1 Foto del prototipo ENEA LIF-Art laser scanner di fluorescenza risolta spettralmente e in tempo nella catacomba di S. Alessandro a Roma. Le modifiche per operare nel ridotto ambiente ipogeo hanno riguardato il sistema di supporto e il riscaldamento aggiuntivo delle ottiche.



Fig. 2 Dimostratore Califfo a Villa dei Quintili. Il Sistema compatto per imaging LIF CALIFFO (Compact Advanced Laser Induced Fluorescence Friendly Operating system) è un dimostratore per misure di fluorescenza indotta da laser a scansione, di dimensioni e peso ridotti per misure in sito.

### staura di beni culturali – ADAMO” (progettoadamo.enea.it)

All'interno di quest'ultimo progetto sono stati realizzati, assieme ai partner del CoE del DTC Lazio, prodotti innovativi relativi a 14 avanzamenti tecnologici ed effettuati 15 interventi dimostrativi sul territorio laziale che hanno coinvolto 15 stakeholder.

La solida interazione stabilitasi con gli stakeholder ha permesso di acquisire all'interno del CoE del DTC Lazio progetti di ricerca (RSI) congiunti nella seconda fase di finanziamento dell'Associazione. Le attività ENEA in tale ambito attualmente continuano con la partecipazione a 10 dei Progetti RSI congiunti approvati nel 2021, 4 dei quali a coordinamento dell'Agenzia. Anche in questa fase le tematiche coperte sono state varie, dalla prevenzione sismica alle diagnostiche per la conservazione di lapidei e superfici dipinte, dal contrasto al biodegrado mediante batteri alla disinfestazione di pergamene,

dall'utilizzo di sistemi robotici per archeologia sottomarina alla gestione di big data su piattaforme informatiche.

### Due macro categorie di stakeholder

Gli stakeholder delle tecnologie nel settore della conservazione dei beni culturali sono grosso modo raggruppabili due macro categorie: quelli istituzionali costituiti dai proprietari/gestori -quali Sovrintendenze, Musei, Parchi archeologici, Fondazioni, ecc...- e quelli costituiti dai conservatori (Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro ISCR, imprese di restauro, fornitori di tecnologie customizzate per la diagnostica, il monitoraggio e il restauro, imprese di servizi, ecc...), mentre la prima categoria vede attori prevalentemente nel settore pubblico, la seconda, ISCR a parte, è dominata dal privato. In ambedue le tipologie di stakeholder sono presenti figure con diverse estrazioni disciplinari che vanno dall'ambito umanistico (storici dell'arte) a quello tecnico (industriale

o artigianale), spesso con scarsa propensione tecnologica.

A livello accademico sforzi recenti di far convergere i due ambiti hanno già portato all'istituzione di corsi universitari di Scienza e tecnologia per i beni culturali ampiamente presenti nell'offerta formativa laziale. Ciononostante le peculiarità dei beni culturali materiali, quali l'unicità accoppiata spesso all'intrinseca fragilità, causano tuttora una certa diffidenza nell'approccio alle tecnologie da parte degli stakeholder che richiedono una riconosciuta non invasività o microdistruttività delle tecnologie. Lo sviluppo di professionalità multidisciplinari e di un adeguato linguaggio comune è diventato una condizione essenziale per portare efficacemente l'innovazione tecnologica nei beni culturali.

Per arrivare ad una convergenza fra stakeholder e sviluppatori di tecnologie per i beni culturali è quindi richiesto che i primi siano convinti della necessità di utilizzare ciò che può essere fornito dai secondi, in quanto solo questo permetterà loro

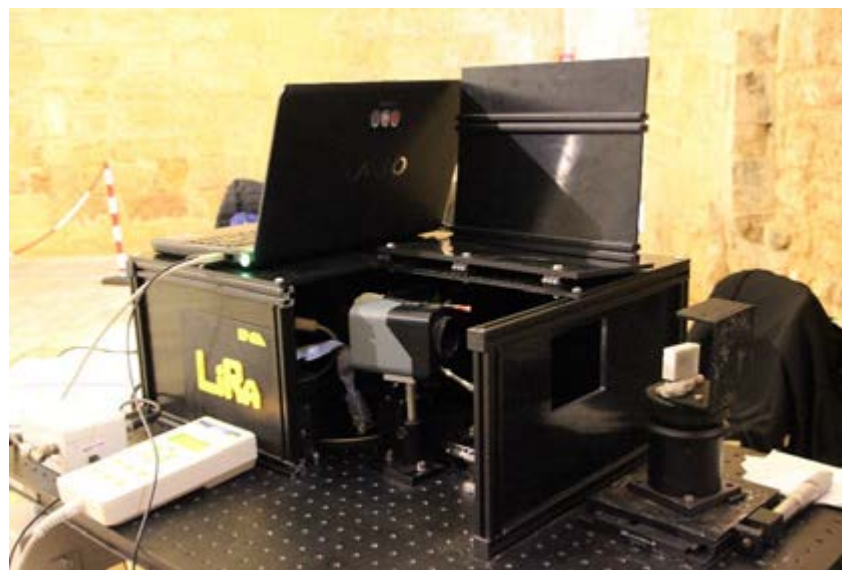


Fig. 3 Sistema LIRA al Museo archeologico di Gioia del Colle (BA) durante un training campo organizzato dall'INFN. L'indagine ha dato informazioni sui materiali e sulla tecnica di realizzazione dei reperti.



Fig. 4 Prototipo ENEA IR-ITR operante presso il Museo del Barocco a Palazzo Chigi di Ariccia. Il prototipo è stato utilizzato per acquisire il modello 3D con l'imaging sub-superficiale di alcuni dipinti eseguiti a più mani ove erano stati ipotizzati ripensamenti. L'adeguamento del prototipo all'utilizzo in situ al Museo ha riguardato l'ottimizzazione delle ottiche per la misura remota nella sala.

**di risolvere significativi problemi di conservazione.**

Questo principio è alla base dell'intensa attività di dimostrazione e disseminazione svolta dagli sviluppatori di tecnologie in ENEA nell'ultimo decennio. Stabilire uno stretto legame con gli stakeholder consente inoltre di prevedere, già in sede di sviluppo di tecnologie e progettazione di prototipi, quelle funzionalità che ne ottimizzeranno l'utilizzo in situ o in laboratorio negli scenari previsti. Va sottolineato che gli scenari applicativi possono essere altamente variabili sia per estensione che per condizioni di operabilità: dal borgo storico all'area archeologica, dall'affresco all'interno di una cattedrale al dipinto su tela in un museo, dalla statua monumentale al reperto orafico e la moneta antica. Riportiamo nel seguito alcuni esempi di needs degli stakeholder che per

ENEA sono stati di stimolo allo sviluppo di prototipi di strumentazione dedicata all'applicazione specifica.

#### **Rivelazione precoce di biodegrado in ambienti ipogei: tombe, catacombe, scavi archeologici**

La scheda controller di CALIFFO, sviluppata interamente in ENEA, si interfaccia attraverso USB con una scheda Raspberry, che è il nodo centrale dell'apparato. La gestione del sistema può essere svolta interamente in remoto su smartphone e tablet, tramite bluetooth o wifi. La motorizzazione dell'ottica di invio della sorgente laser (a 405 nm) permette la scansione di un'area di 1 m<sup>2</sup> alla distanza di due metri. L'acquisizione e la successiva elaborazione degli spettri di fluorescenza permette la caratterizzazione chimica della superficie indagata,

dando la possibilità di creare mappe che consentono di individuare la presenza di microorganismi fluorescenti (alghe verdi, cianobatteri) fornendo, quindi, indicazioni utili ai processi di conservazione e restauro. CALIFFO è stato sviluppato per utilizzo ravvicinato sul campo in situazioni disagiate, con difficoltà di accesso anche in assenza di alimentazione di rete (funziona a batteria). CALIFFO con i dati raccolti durante una sua operazione in campagna dimostrativa è mostrato nella figura sottostante.

**Stratigrafia di superfici dipinte in scavi archeologici e rispettivi musei**

Il sistema trasportabile integrato per spettroscopia laser LIRA (LIBS - Raman Integrated System) è un dimostratore per misure di spettroscopia mediante le tecniche LIBS e Raman. La combinazione delle due spettroscopie permette di ottenere informazioni complete sulla composizione atomica e molecolare del campione analizzato. La stratigrafia può essere effettuata mediante LIBS per ablazione successiva di strati sottostanti del campione, essendo la tecnica micro distruttiva. La componentistica è stata selezionata affinché il sistema possa soddisfare i requisiti necessari per entrambe le tecniche, e differenti ottiche di focalizzazione sono utilizzate alternativamente nei due percorsi di misura. L'acquisizione e l'elaborazione dei dati è eseguita da PC portatile. Le componenti principali di LIRA sono: il laser a 532 nm, l'ottica di invio e focalizzazione, l'ottica di raccolta del segnale e fibra ottica, lo spettrometro, l'elettronica di controllo.

Le dimensioni e il peso ridotti dei vari componenti rendono il sistema facilmente trasportabile sul suo carrello e ne favoriscono l'utilizzo in situ, LIRA è infatti stato sviluppato per utilizzo ravvicinato sul campo. La sua applicazione principale è relativa alla caratterizzazione di materiali, tipicamente frammenti o oggetti di piccole dimensioni (avvicinabili allo strumento).

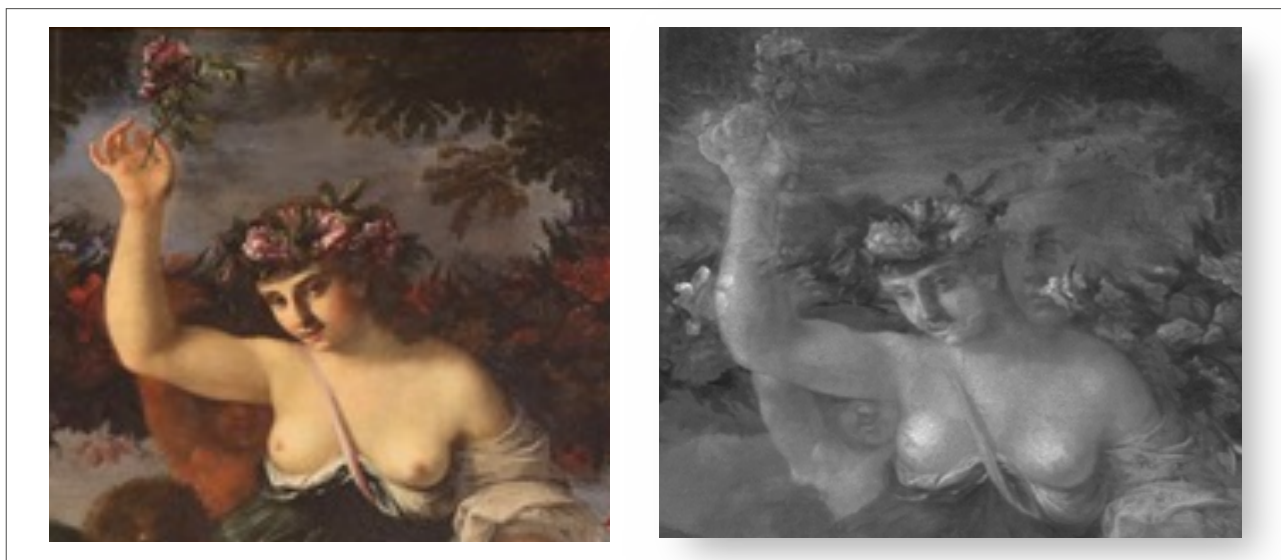


Fig. 5 Il dettaglio a sinistra del dipinto a olio su tela “La primavera” di Filippo Lauri e Mario Nuzzi, evidenzia la presenza di un ripensamento sulla posizione della testa, non identificabile nella foto a colori.

**Una richiesta significativa degli stakeholder durante il progetto ADAMO ha riguardato la possibilità di effettuare in maniera non distruttiva imaging sub-superficiale.** Allo scopo, al prototipo ENEA RGB-ITR operante in visibile per imaging e morfologia superficiale è stato affiancato un nuovo prototipo operante nell'infrarosso, permettendo la penetrazione sotto lo strato superficiale dipinto di

uno spessore confrontabile con la lunghezza d'onda utilizzata. Le caratteristiche dell'IR-ITR allestito sono relative all'utilizzo di un laser IR operante a  $1.5 \mu\text{m}$  e di ottiche di rinvio e raccolta adeguate a questa lunghezza d'onda. Il principio di funzionamento, con sistema di scansione XY e modulazione in ampiezza per ottenere la distanza Z, è stato lo stesso dell'RGB-ITR brevettato. Il range operativo ottenuto è stato

fino a 15-20 m, la risoluzione misurata a 10 m, nelle condizioni di misura sul campo, è stata di 1 mm. Il sistema operante nelle prime misure sul campo effettuate durante una campagna del progetto ADAMO è mostrato nella foto sottostante assieme ad un risultato significativo relativo alla rivelazione di un ripensamento.

# Strumenti e tecnologie ICT per conservare, conoscere e valorizzare il Patrimonio Culturale

La “transizione digitale” è un percorso necessario e indispensabile per dare risposte alla complessità che si genera nella gestione dei beni culturali. In questo contesto, la Divisione per lo sviluppo sistemi per l’Informatica e l’ICT e la Divisione Smart Energy del Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili dell’ENEA, hanno sviluppato notevoli competenze nell’ambito di progetti regionali, nazionali ed europei e partecipano da diversi anni alle attività di ricerca per il Patrimonio Culturale.

DOI 10.12910/EAI2022-016



di Giorgio Graditi, Direttore Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, ENEA

Il patrimonio culturale si identifica come l’insieme di beni materiali e immateriali, mobili e immobili, e paesaggistici che testimoniano la storia e le tradizioni di civiltà e popoli; esso costituisce la memoria tangibile e intangibile di ciò che l’uomo ha creato e trasmesso (e continua a creare e trasmettere) e rappresenta l’identità di un paese ed è per questo oggetto di valorizzazione e tutela. Il patrimonio culturale è, quindi, un ponte tra le generazioni: lo ereditiamo dal passato e attraverso esso proiettiamo i nostri valori e le nostre identità nel futuro. La rivoluzione digitale sta trasformando gli individui, ridisegnando le comunità, attribuendo nuove prospettive al patrimonio culturale, costruendo e rafforzando le relazioni tra le persone, il patrimonio e le manifestazioni della cultura, producendo

stabilità nelle società e accrescendo la fiducia e la capacità di generare opportunità per il futuro.

**Alla luce delle continue minacce generate dagli eventi naturali, dalle guerre e dai rischi di deterioramento degli elementi del patrimonio artistico più antichi e fragili, la rivoluzione digitale in corso sta delineando nuove modalità di fruizione dei dati volte ad integrare competenze e conoscenze essenziali per la salvaguardia e la trasmissione alle generazioni future del Cultural Heritage.**

Il termine digitalizzazione nei processi di salvaguardia, conservazione e valorizzazione, è comunemente usato per indicare la “conversione digitale”, ossia la trasformazione di un oggetto da analogico a digitale che consente di archiviare, elaborare e condividere i dati tramite le tecnologie dell’informazione

e della comunicazione; le copie digitali (Digital-Twin) degli elementi del patrimonio culturale coinvolgono tutti gli aspetti della vita di un bene, dai rilievi 3D per la documentazione sino alle iniziative di Realtà Aumentata per la sua fruizione.

**In tal senso, la “transizione digitale” rappresenta un percorso necessario e indispensabile per dare risposte alla complessità che si genera nella gestione dei beni culturali.** Uno sforzo notevole va nella direzione di catalogare i beni culturali mediante opportune basi di dati, che consentano di disporre di un inventario dei beni stessi, volto non solo ad implementare la documentazione, ma a svolgere anche un ruolo di supporto alle attività di studio, formazione, ricerca, monitoraggio, diagnostica, restauro, tutela e valorizzazione. Con la “trasformazione digitale”, la di-



gitalizzazione, quindi, acquisisce un significato più esteso; mira ad ottimizzare le logiche di lavoro, ridisegnare le modalità di interazione tra gli utenti coinvolti, sviluppare ed implementare nuovi modelli di creazione del valore nell'ambito degli ecosistemi che vengono abilitati dalle piattaforme digitali, attivare percorsi virtuosi per l'efficiamento nella gestione, conservazione e fruizione dei beni.

Tali piattaforme, accessibili via web, sono sempre più largamente diffuse e utilizzate per la gestione del ciclo produttivo del contenuto culturale dedicato all'intera "catena del valore" (conoscenza, diagnostica, conservazione, restauro, valorizzazione, godimento e gestione).

### Sfide non solo tecnologiche

Le sfide non sono, pertanto, soltanto di natura tecnologica, ma necessitano di un'azione orientata ad avvicinare il patrimonio culturale alla piena fruizione nella sua dimensione fisica, digitale e cognitiva. Per perseguire tale obiettivo occorre definire e pianificare strategie che coniughino la dimensione culturale con quella funzionale e gestionale, attivando un processo di continua evoluzione e di cambiamento della visione, dei processi e dei sistemi operativi teso

### ad accrescere il valore economico e sociale generato per e con i cittadini.

La Divisione per lo sviluppo sistemi per l'Informatica e l'ICT, del Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili dell'ENEA, partecipa da diversi anni alle attività di ricerca per il Patrimonio Culturale ed ha sviluppato notevoli competenze nell'ambito di progetti regionali, nazionali ed europei (IT@CHA, TIGRIS, DySCO, ICTARC, HER.M.E.S., COBRA, ARCH, ECODIGIT, IKAROS, D-TECH ecc.). In particolare, si cita l'infrastruttura ICT per i beni culturali denominata ITH@CHA che è accessibile, previa autenticazione, tramite un portale dedicato; essa è completamente immersa nel sistema di calcolo ENEAGRID/CRESCO 6 e si basa sulla tecnologia dei "laboratori virtuali", ossia su piattaforme virtuali, fruibili via Internet, da remoto, che mettono a sistema risorse hardware/software, capacità di calcolo, storage virtualmente illimitato, su file system geograficamente distribuiti di tipo AFS, GPFS o su ownCloud.

Attraverso ITH@CHA sono anche accessibili codici finalizzati al calcolo strutturale e alla grafica computazionale, strumenti di visualizzazione, nonché risorse HPC (High Performance Computing) per l'intera cate-

na di modellazione numerica (dalle ricostruzioni 3D da nuvole di punti, ai modelli per l'analisi agli elementi finiti), aree per condividere immagini, risultati, documenti e archivi di grandi moli di dati eterogenei per quantità e tipologia, che risultano di ausilio e supporto sia agli esperti che operano nel settore, sia ai gestori e proprietari dei beni culturali.

Da molti anni, l'attività di ricerca, impiega un approccio integrato modelli/sensori, per sviluppare metodi e tecnologie specifiche per il monitoraggio diagnostico, effettuato attraverso l'analisi dello stato di degrado delle opere d'arte e monumenti, al fine di pianificare: (i) gli interventi di restauro più idonei, (ii) la diffusione dei risultati ottenuti con tali interventi, (iii) la conoscenza integrata finalizzata ad acquisire e condividere informazioni e dati (intelligenza artificiale), (iv) la definizione di nuove modalità di fruizione e di visita a siti e monumenti, (v) il supporto alle attività di monitoraggio strutturale e conservativo volto alla pianificazione manutentiva di beni mobili e immobili anche di grande estensione (complessi architettonici e/o siti archeologici), (vi) l'applicazione di algoritmi di Deep learning e Computer Vision per la catalogazione, la conservazione e la valorizzazione dei beni culturali, (vii) la messa a punto di processi speditivi per la modellazione di edifici storici per lo sviluppo di modelli HBIM (Historical Building Information Modeling).

### L'ENEA Staging Storage Sharing

Nell'ottica di consolidare la collaborazione tra esperti della comunità scientifica che operano nel settore della protezione sismica e messa in sicurezza di strutture civili, storico monumentali e singole opere d'arte, oltre alla realizzazione del laboratorio virtuale DySCO "structural Dynamics, numerical Simulation, qualification tests and vibration Control" - primo esempio in Italia di speri-

mentazione condivisa a distanza per le prove su tavola vibrante del C.R. ENEA Casaccia, come strumento innovativo a supporto dell'ingegneria sismica - la divisione ICT ha sviluppato un'architettura denominata "ENEA Staging Storage Sharing" (E3S), per l'archiviazione, la "sperimentazione condivisa" in real time e il post-processing dei dati prodotti "step by step" durante le campagne di misura. Ciò consente di ridurre i tempi necessari all'esecuzione delle prove e all'elaborazione dei risultati da parte di utenti remoti, in completa autonomia e indipendentemente dalla propria posizione geografica.

Il laboratorio di analisi e protezione delle infrastrutture critiche, della divisione Smart Energy del Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili dell'ENEA, opera nel settore dello sviluppo di una nuova generazione di Sistemi di Supporto alle Decisioni (DSS) per il monitoraggio e l'analisi del Rischio in Distretti di Beni Culturali. Si tratta di aree caratterizzate dalla presenza di numerose opere d'arte, in alcuni casi, dislocate in zone a forte rischio "naturale" (ad esempio rischio sismico e altri fenomeni geodinamici anche attivati da precipitazioni, possibili esondazioni etc.). In questi Distretti vi è la necessità di prevedere eventi avversi sia per attivare le azioni adeguate a salvaguardare i beni presenti sia per predisporre piani efficaci per la gestione del rischio e delle emergenze.

La strategia proposta da ENEA è di integrare i beni culturali in una più vasta classe di "infrastrutture critiche" (tutte le reti di servizi primari come l'elettricità, le telecomunicazioni, le infrastrutture viarie, etc.), le cui funzioni e la cui integrità devono essere co-

stantemente garantite. Infatti, le opere ed i beni artistici possono essere impattati sia direttamente dagli eventi esterni, sia indirettamente, attraverso la perdita di servizi necessari alla loro conservazione/protezione/fruizione (i.e. elettricità, telecomunicazioni).

### **Un'unica piattaforma di monitoraggio e analisi del rischio**

In questo senso è stato sviluppato un DSS denominato CIPCast che vede infrastrutture critiche e Beni Culturali integrati in un'unica piattaforma di monitoraggio e analisi del rischio in grado di fornire previsioni di eventi e dei loro impatti sul territorio, al fine di consentire a tutti gli operatori una pronta ed efficace valutazione dello scenario atteso, nonché l'implementazione di efficaci e tempestive contromisure. Questo approccio è all'origine delle attività svolte nell'ambito di un importante progetto europeo H2020 (progetto ARCH) che ha avuto come area di interesse il Distretto di Camerino-Fabriano-Matelica nelle Marche. Il DSS CIPCast raccoglie dati di monitoraggio delle opere e dati di previsione di eventi per fornire una mappa multi-sistemica degli impatti attesi.

La piattaforma eroga il suddetto servizio su web in modalità SaaS (Software as a Service), consentendo ai diversi operatori di accedere simultaneamente ai dati ed alle relative analisi effettuate al fine di avere contezza dei potenziali impatti determinati da una specifica perturbazione prevista in una data area geografica.

**Tutte le attività di R&D&I sopra descritte sono in linea con i programmi**

di ricerca, fondamentale e/o industriale, su tematiche strategiche previste nel PNR 2021-2027 del MUR e nel Cluster Horizon Europe per il Patrimonio Culturale, nell'ambito dell'Heritage Science (nanomateriali e nuove tecnologie per ricognizione, diagnosi, studio, restauro e per la gestione dei big data come condivisione aperta di tutti i risultati delle indagini effettuate) e al Digital Heritage (ricostruzioni 3D, realtà immersive, digitalizzazione per restauro e fruizione).

La tutela, la conservazione, la valorizzazione, la fruizione del patrimonio culturale di una nazione, di un popolo, di una civiltà rappresentano un bene comune di valore inestimabile sia come preservazione della memoria della comunità nazionale e del suo territorio, sia come leva fondamentale per l'evoluzione culturale ed il progresso.

**Hans-Georg Gadamer ci ha insegnato che "la cultura è l'unico bene che, quando viene distribuito, aumenta di valore"; in tal senso è necessario operare un cambio di paradigma, di prospettiva, che garantisca l'accessibilità a tutti con ricadute positive dal punto di vista sociale, economico, culturale.** In tale contesto risultano centrali lo sviluppo e l'implementazione delle tecnologie abilitanti digitali e non - realtà aumentata e tecnologie visuali interattive, big data e social media mining - per favorire migliori condizioni di utilizzo e fruizione sostenibile dei beni culturali, di strumenti e modelli per la loro valorizzazione e di soluzioni predittive ed evolute per la tutela e la conservazione.

# L'arte come patrimonio da valorizzare

Nella conservazione, riqualificazione, messa in sicurezza e valorizzazione dei beni culturali una delle esigenze più sentite è definire strategie sostenibili di fruizione, sfruttando le potenzialità offerte dalla ricerca, con lo sviluppo e l'applicazione di nuove tecnologie. Il Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali dell'ENEA, dispone di competenze multidisciplinari che agiscono in maniera trasversale e sinergica e di strumenti e infrastrutture avanzati, e talvolta unici nel loro genere a livello nazionale e internazionale.

DOI 10.12910/EAI2022-017



di Roberto Morabito, Direttore del Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali, ENEA

**L'**ENEA, con le tecnologie e le competenze sviluppate a partire da circa il 1980, opera all'interno del settore della cosiddetta *science conservation* occupando in alcuni campi specifici un posto di rilievo e di riferimento nel panorama italiano ed il Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali (SSPT) è impegnato in vari settori della conservazione: dalla diagnostica strutturale applicata ai monumenti a quella su piccoli manufatti mobili di pregio (dipinti, tappeti, strumenti musicali, ecc.), dal supporto tecnico-scientifico per il restauro alla messa a punto di biotecnologie per la conservazione. Questo impegno viene concretizzato in maniera trasversale, coinvolgendo specifiche professionalità e tecnologie avanzate, per ricercare soluzioni ai problemi del settore che rispettino il fondamentale requisito della sostenibilità.

Per il patrimonio storico-artistico sostenibile significa reversibilità degli interventi, in modo tale da poterli rimuovere senza alterare il bene

originale quando l'evoluzione della tecnologia li rende obsoleti, l'uso di materiali e prodotti che rispettino

l'ambiente, quindi non tossici e semplici da smaltire, e l'economicità degli stessi.



Fig. 1 Identificazione delle aree oggetto di studio





Fig. 2 Il percorso di visita agli scavi archeologici

### Competenze multidisciplinari e un approccio integrato e multiscala

In questo contesto, il Dipartimento SSPT, attraverso competenze multidisciplinari che agiscono in maniera trasversale e sinergica e strumenti e infrastrutture avanzati, e talvolta unici nel loro genere sia a livello nazionale che internazionale, ha messo a punto un approccio integrato e multiscala che va dall'analisi del territorio e del contesto in cui insiste il bene, all'analisi dei rischi (ambientale, statico strutturale e antropico) per arrivare alla caratterizzazione dei materiali costitutivi e dello stato di conservazione, e al supporto in fase di intervento di recupero strutturale e restauro la cui definizione rappresenta spesso una grande sfida per restauratori, storici dell'arte e ricercatori, data l'entità e la diversità degli oggetti coinvolti e l'enorme varietà di materiali utilizzati. Le attività per la salvaguardia di un bene storico possono comprendere lo sviluppo completo ed esaustivo di

ciascuna delle fasi di intervento su un bene, dalla conoscenza alla definizione della specifica soluzione d'intervento "su misura".

Il risultato si rispecchia in programmi di ricerca all'avanguardia, in campo nazionale e internazionale, e nell'offerta di servizi qualificati e unici richiesti

dall'esterno, sia da istituzioni afferenti al Ministero dei Beni Culturali sia da operatori dei settori pubblici e privati; nel settore dei dipinti, ad esempio, sono stati condotti recenti studi sull'Adorazione dei Magi e sulla Scapigliata di Leonardo e sui tre dipinti di Raffaello conservati nella Galleria Borghese. L'ENEA, inoltre, è Socio fondatore dell'Associazione Centro di Eccellenza del Distretto Tecnologie per la Cultura (DTC) della Regione Lazio, nell'ambito del quale sono stati finanziati i progetti RIPARA, "Sistemi integrati di miglioramento sismico del patrimonio architettonico" e SIS-DAT, "Sistema per la Simulazione dei Danni da Terremoto".

Il progetto RIPARA si propone di mettere a punto una tecnologia innovativa per la protezione sismica del patrimonio architettonico, ricorrendo ad una ristolatura armata attiva dei giunti di malta mediante micro-trefoli di acciaio inossidabile. Il progetto prevede attività di indagine e rilevamento sul campo e di sviluppo sperimentale per la prototipazione del sistema e la sua validazione con test sismici su tavola vibrante, per verificare l'efficacia della tecnologia proposta e mettere a punto strumenti computazionali di modellazione strutturale avanzata e



Fig. 3 Dettaglio degli affreschi della chiesa medioevale di Santa Caterina



Fig. 4 Vista interna dell'esedra (a) e lastricato romano (b)

approcci speditivi per la progettazione degli interventi.

Il progetto SIS-DAT affronta ed implementa in un unico apposito sistema GIS, una metodologia di analisi multidisciplinare che combina informazioni geologiche e geotecniche (pericolosità sismica e risposta sismica locale), modelli di stabilità strutturale del bene architettonico (singolo o di aggregati tipologici), dati catastali e dati di monitoraggio in remoto (da satellite e da terra), per la produzione di mappe del danneggiamento atteso dei centri storici (per il progetto il centro storico di Rieti), in relazione a definiti livelli di sismicità e considerando anche l'influenza esercitata dalla eventuale presenza di cavità sotterranee.

#### Tecniche sofisticate per manufatti fragili: l'esempio della Crypta Balbi

Le metodologie e le tecniche impiegate sono funzione della tipologia di bene oggetto di studio e vanno dal macro al micro con tecniche tanto più sofisticate quanto più il bene in questione è fragile e deteriorabile. Esempi virtuosi di applicazione di approcci multidisciplinari integrati per la conoscenza di un monumento, di

tecniche sofisticate per manufatti fragili e dell'utilizzo di materiali sostenibili e atossici per il restauro se ne contano innumerevoli in ENEA grazie alle expertise sulle quali può contare.

A titolo di esempio se ne riportano due tra quelli degni di nota: l'approccio multidisciplinare, relativo alla fase di conoscenza, applicato nella valutazione delle parti a maggior vulnerabilità sismica e maggior rischio di collasso statico del complesso museale della **Crypta Balbi**; il biorestauro delle opere d'arte mediante l'utilizzo di procedure innovative di pulitura e consolidamento che impiegano ceppi microbici non patogeni e prodotti di origine microbica e vegetale.

La Crypta Balbi è un vasto complesso di edifici, dislocati su un intero isolato, che nei secoli ha visto diversi usi e insediamenti fino a divenire attualmente una delle sedi del Museo Nazionale Romano. In età romana la Crypta era un vasto cortile porticato annesso al teatro di Balbo, dove gli spettatori trovavano riparo in caso di pioggia o si radunavano durante le pause degli spettacoli; sul lato opposto al teatro si apriva un'ampia esedra decorata all'interno con statue.

Lo splendore del monumento romano,

e delle abitazioni a ridosso, nel tempo lasciò il passo all'incuria ed all'abbandono: al muro della Crypta si addossarono le nuove abitazioni dei mercanti, la cui presenza è ricordata nel nome della attuale Via delle Botteghe Oscure, mentre al centro di quello che era il portico del teatro romano venne costruita nel IX secolo la chiesa di Santa Maria Domine Rose che successivamente fu trasformata nella chiesa e nel monastero dedicati a Santa Caterina di Alessandria. All'età medioevale risalgono le case di via dei Delfini ed al Settecento la vicina chiesa ancora esistente di San Stanislao, con l'annesso ospizio dei Polacchi.

Agli inizi degli anni Quaranta del secolo scorso l'area dell'antico monastero cadde in uno stato di abbandono e le aree circostanti l'isolato della Crypta Balbi vennero interessate da importanti interventi urbanistici, mentre le case intorno continuarono a essere abitate fino agli anni Sessanta, quando le ricerche archeologiche identificarono con il complesso di Balbo i resti ancora visibili dell'antico monumento. Ed è proprio qui che duemila anni dopo, in quelle stesse strutture, sorge il Museo la cui specificità è quella di essere un museo di archeologia urbana,

che ricerca e documenta l'evoluzione di quello spazio, dei suoi insediamenti e delle sue destinazioni d'uso lungo i secoli.

Nel corso del 2019, su incarico del Museo Nazionale Romano, l'ENEA è stata chiamata ad eseguire sopralluoghi e prove diagnostiche non distruttive per la valutazione delle parti a maggior vulnerabilità sismica ed a maggior rischio di collasso statico del complesso della Crypta Balbi, al fine di fornire indicazioni utili alla gestione degli spazi e dei percorsi di visita che garantiscano le condizioni di sicurezza dei visitatori. L'intervento, finalizzato a definire quali parti del complesso fossero a maggiormente a rischio di collasso, sia in condizioni statiche che sismiche, ha interessato gli aggregati degli edifici prospicienti le vie che delimitano l'isolato, oltre al percorso di visita agli scavi archeologici che occupano l'area centrale del complesso (Fig. 1) ed ha visto l'applicazione di un approccio multidisciplinare e di metodologie e tecniche integrate.

Per quanto riguarda gli edifici, la mappatura è stata effettuata con l'ausilio di schede di rilievo, appositamente predisposte da ENEA, per l'ispezione programmata degli elementi architettonici delle cattedrali e dei monumenti, in base agli indirizzi per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni.

L'ispezione, finalizzata al rilievo del danno agli elementi architettonici e strutturali, ovvero delle multiformi manifestazioni del loro degrado, è stata condotta in tutti i locali accessibili tramite controllo visivo ed in alcuni casi controllo strumentale. Per ogni locale è stato espresso un giudizio graduato su sei livelli di danno -nullo, lieve, moderato, grave, molto grave, crollo- al quale sono stati associati dei Livelli di Allerta su una scala da 1 (assenza di danno) a 5 (stato limite di imminente collasso), anche in relazione alla destinazione d'uso ed alle ca-

ratteristiche di affollamento dei locali. Inoltre, è stato deciso che le successive ispezioni saranno tanto più frequenti quanto maggiore è il livello di allerta. La campagna di ispezione ha messo in luce un livello di allerta piuttosto elevato per gli edifici attualmente non in uso ed in attesa di un intervento di recupero e rifunzionalizzazione, in particolare per gli aggregati su via dei Delfini e su via delle Botteghe Oscure, ai quali è stato assegnato un Livello di Allerta 5.

Successivamente, l'identificazione e la valutazione delle vulnerabilità ha riguardato il percorso di visita agli scavi archeologici (Fig. 2), caratterizzato da alcuni elementi salienti tra i quali il lavatoio, le murature affrescate della chiesa/convento medioevale di Santa Caterina (Fig. 3), l'edera ed il lastricato romano (Fig. 4) che, sebbene all'aperto, presentavano alcune situazioni potenzialmente a rischio.

Il percorso che conduce al lavatoio, ad esempio, è adiacente ad una muratura di notevole elevazione, sulla quale sono state effettuate sia verifiche numeriche, per valutare i possibili cinematismi di collasso in caso di azione sismica, sia verifiche vibrazionali, mediante il monitoraggio ambientale, che hanno evidenziato una situazione di instabilità degli sgocciolatoi in laterizio e della

sopraelevazione della muratura.

Anche sull'edera sono state riscontrate delle criticità legate sia alla mancanza di un pilastro, puntellato non in tempi recenti (quindi non nel rispetto delle norme vigenti) con un contrafforte in tubi Innocenti che si presentavano completamente ossidati, sia ad una porzione di paramento murario dell'emiciclo ad incipiente rischio di distacco. Per ovviare a queste problematiche si è consigliato di modificare il percorso di accesso all'edera in modo tale da evitare l'area dove manca il pilastro e di mettere in sicurezza la parte di muratura a rischi di distacco.

Stessa considerazione è stata fatta per l'area di passaggio al locale lastricato romano, interessato da una serie di puntoni di sostegno delle strutture che sono stati analizzati con la tecnica del *moto magnificato*.

Le murature lungo il percorso di visita sono state rilevate mediante *schede di rilievo informatizzate* e caratterizzate con l'impiego di tecniche non distruttive come la *termografia*, le *indagini soniche*, le *prove penetrometriche sulle malte* (Fig. 5) ed il prelievo di campioni da analizzare in laboratorio (*analisi morfologiche al microscopio elettronico*), mettendo in luce un discreto stato di conservazione ad eccezione di alcune parti più degradate.



Fig. 5 Prova penetrometrica sulle malte delle murature della chiesa/convento di Santa Caterina

Interventi sostenibili sulle opere d'arte: il biorestauro

Alcuni dei prodotti comunemente usati nel restauro sono miscele complesse di sostanze, utilizzate prevalentemente indoor, e che possono avere effetti sulla salute degli operatori e danneggiare per la loro aggressività le opere stesse. Il loro smaltimento, inoltre, se non è effettuato in modo appropriato, può danneggiare l'ambiente.

La transizione verso prodotti e pratiche che rispettino l'ambiente e gli operatori è rappresentata dalle procedure innovative di pulitura e consolidamento e da servizi avanzati per lo sviluppo di pratiche di restauro sostenibile, basati sull'impiego di ceppi microbici non patogeni e prodotti di origine microbica e vegetale.

Le tecnologie microbiche sviluppate in ENEA sono basate sull'uso di batteri isolati da diverse matrici ambientali (Fig. 6), che spaziano da siti contaminati da metalli pesanti ed idrocarburi alle opere d'arte deteriorate.

I microrganismi, isolati e caratterizzati dal punto di vista tassonomico e funzionale, sono conservati nella collezione di ceppi ENEA-MIRRI. E' una collezione microbica composta da circa 1.500 microrganismi isolati da diverse matrici ambientali ed ecosistemi naturali, con notevoli potenzialità applicative nei campi ambientale, beni culturali, salute, agroalimentare e bioenergia, che afferisce al nodo italiano di MIRRI (Microbial Resource Research Infrastructure), il più grande network di centri europei per la salvaguardia della biodiversità microbica a fini di sostenibilità ambientale, sviluppo biotecnologico e crescita della bioeconomia. Le tecnologie microbiche rispondono bene alle esigenze legate a questo processo di transizione, presentando alcuni vantaggi rispetto ai tradizionali metodi chimico-fisici: selettività e quindi bassa aggressività per l'opera, compatibilità ambientale, bassi costi di applicazione, tutela della salute dell'operatore, assenza di problemi etici. Possono inoltre intervenire dove i metodi tradizionali non sono

sufficienti o, nel tempo, hanno perso la loro efficacia a causa dell'insorgenza di resistenze, nel caso dei biocidi per la rimozione di patine biodeteriogene, o a causa di alterazioni della matrice legate al tempo e alle pratiche di restauro precedenti. **Le ricerche ENEA sono finalizzate allo sviluppo di procedure di restauro basate sull'uso di microrganismi e altri prodotti bio-based, per affrontare, in collaborazione con funzionari e restauratori, problematiche reali di conservazione e restauro, di volta in volta diverse, per la ricerca di soluzioni ad hoc.**

In questa prospettiva, le attività ENEA mirano ad espandere l'esplorazione sulle potenzialità dei microrganismi, diversificando, attraverso i casi studio affrontati, i microrganismi utilizzati, i materiali costitutivi sui quali applicarli (carta, pergamena, affreschi, dipinti murali, materiale lapideo, legno), i depositi da rimuovere (colla animale e sintetica, resine, gessi, carbonati, caseine, idrocarburi, olii, etc.) e le modalità di applicazione.

#### Lo sviluppo di prodotti fitoderivati

Nel campo della disinfezione e della

**rimozione di patine biologiche** che degradano opere e monumenti, l'ENEA è coinvolta nello sviluppo di sostanze attive e coformulati derivati da estratti vegetali in collaborazione con aziende, Università e Centri di Ricerca. L'Agenzia Chimica Europea (ECHA) promuove lo sviluppo di sostanze e metodi più sicuri e sostenibili nel restauro e nella conservazione del patrimonio culturale, che soddisfino i requisiti di sostenibilità ambientale, sociale ed economica. **Lo sviluppo di prodotti fitoderivati** risponde perfettamente alla necessità di trovare alternative "verdi" e, negli ultimi anni, è cresciuto l'interesse per lo sviluppo di nuovi biocidi bio-based.

Fitoderivati, fitoestratti ed oli essenziali, grazie ai loro principi attivi e metaboliti secondari esplicano un'azione biostatica e biocida verso diverse classi di microrganismi. La loro efficacia contro i comuni agenti patogeni umani (batteri, funghi e lieviti) è nota e vengono utilizzati in molti campi applicativi, quali alimentazione, medicina e industria farmaceutica. **Recente è la sperimentazione del loro uso per contrastare e contenere il biodeterioramento di archivi, biblioteche, mu-**



Fig. 6 Tasselli di biopulitura con batteri, prima e dopo la rimozione del "micro-pack". Dipinti murali di Casina Farnese al Palatino (Roma).

sei e monumenti lapidei ad opera di microrganismi nocivi.

Inoltre, la complessità della composizione di questi estratti naturali garantisce un ampio spettro di efficacia e, parallelamente, riduce l'insorgenza di fenomeni di resistenza negli organismi target, permettendo dosi di utilizzo inferiori rispetto a formulati di sintesi e una copertura prolungata nel tempo.

Nell'ambito dello sviluppo di biomateriali applicabili nel restauro dei beni culturali, l'ENEA coordina il proget-

to "Nopal" cofinanziato dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale, che vede la collaborazione tecnica bilaterale con El Colegio de Michoacán (Messico). Le attività mirano alla definizione di una metodologia scientifica per la valutazione delle proprietà degli estratti di mucillagini dai cladodi dell'Opuntia ficus indica (Nopal), ampiamente usati in Messico e noti per tradizione empirica come additivi delle malte perchè dotati di effetto consolidante e protettivo.

Fine ultimo del progetto è sviluppare un prodotto bio-based innocuo, e rispettoso della salute dei restauratori, da utilizzare in sostituzione di consolidanti e protettivi di sintesi per conferire solidità e contrastare il deterioramento di opere d'arte dovuto a cause di tipo ambientale (fattori di origine chimica e biologica). Tale prodotto ha inoltre minimo impatto ambientale e minimo scarto, in sintonia con i principi dell'economia circolare.

# Le interviste

## Apriamo sempre più i nostri Musei per condividere i valori dell'Arte



Intervista con Barbara Jatta, *Direttrice dei Musei Vaticani*  
A cura di Laura Moretti

Barbara Jatta, storica dell'arte, museologa, membro di comitati scientifici del Louvre e dell'Ermitage, dirige i Musei Vaticani da gennaio 2014. Nell'affidarle questo patrimonio di arte, bellezza e cultura con oltre 500 anni di storia e quasi 7 milioni di visitatori l'anno, Papa Francesco le ha chiesto di "spalancare le porte alle persone di tutto il mondo", di farne "sempre più il luogo del bello e dell'accoglienza", non "solo per eletti e sapienti", ma "una realtà vitale, da raccontare agli uomini di oggi, a cominciare dai più umili". In questa intervista vogliamo approfondire con lei alcune delle tematiche più attuali dei beni culturali, alla luce di questa 'missione' così impegnativa.

**Dott.ssa Jatta, quando è stata nominata Direttrice, lei ha sottolineato che il suo primo obiettivo sarebbe stato far conoscere, preservare, condividere lo straordinario lascito di cultura, storia e bellezza che i pontefici romani hanno raccolto e custodito per secoli. Quale è oggi il bilancio di questa sua triplice missione?**

Il bilancio è assolutamente positivo, anche se due di questi cinque anni sono stati di pandemia, con problematiche che si sono completamente capovolte rispetto all'inizio. Se all'esordio del mio mandato abbiamo puntato sull'espansione delle presenze, sulla crescita dei progetti espositivi, editoriali, di restauro ad ampio raggio e di tutta la panoramica delle nostre collezioni e dei nostri reparti, dalla pandemia in poi abbiamo dovuto ridimensionare e ripensare tante attività. Al loro posto ne abbiamo sviluppate e incrementate molte altre, come ad esempio la valorizzazione delle collezioni interne sulla quale ab-

biamo puntato molto, piuttosto che sulle grandi mostre in collaborazione con altre istituzioni.

**“La nostra missione è accogliere migliaia di persone al giorno per condividere un patrimonio di arte, bellezza e cultura unico al mondo,”**

**A questo proposito, in una recente intervista lei ha affermato che la condivisione della bellezza è fondamentale e che “condividere” è proprio la missione dei Musei Vaticani.**

È così. Ci chiamiamo Musei Vaticani, non il Museo Vaticano, perché siamo un insieme di collezioni, sette chilometri di percorso con 16 reparti che vanno dai materiali organici al museo etnografico, dalle pitture agli affreschi, dalle sculture alle mummie egizie fino al restauro di opere d'arte contemporanea. La missione però è una sola: accogliere migliaia di persone al giorno e condividere un patrimonio di arte, bellezza e cultura unico al mondo. Pensi che nel 2019, prima della pandemia, abbiamo raggiunto quasi sette milioni di visitatori.

**Ma quando la possibilità di condividere viene a mancare, come ad esempio nel periodo della pandemia, quali possono essere le soluzioni alternative?**

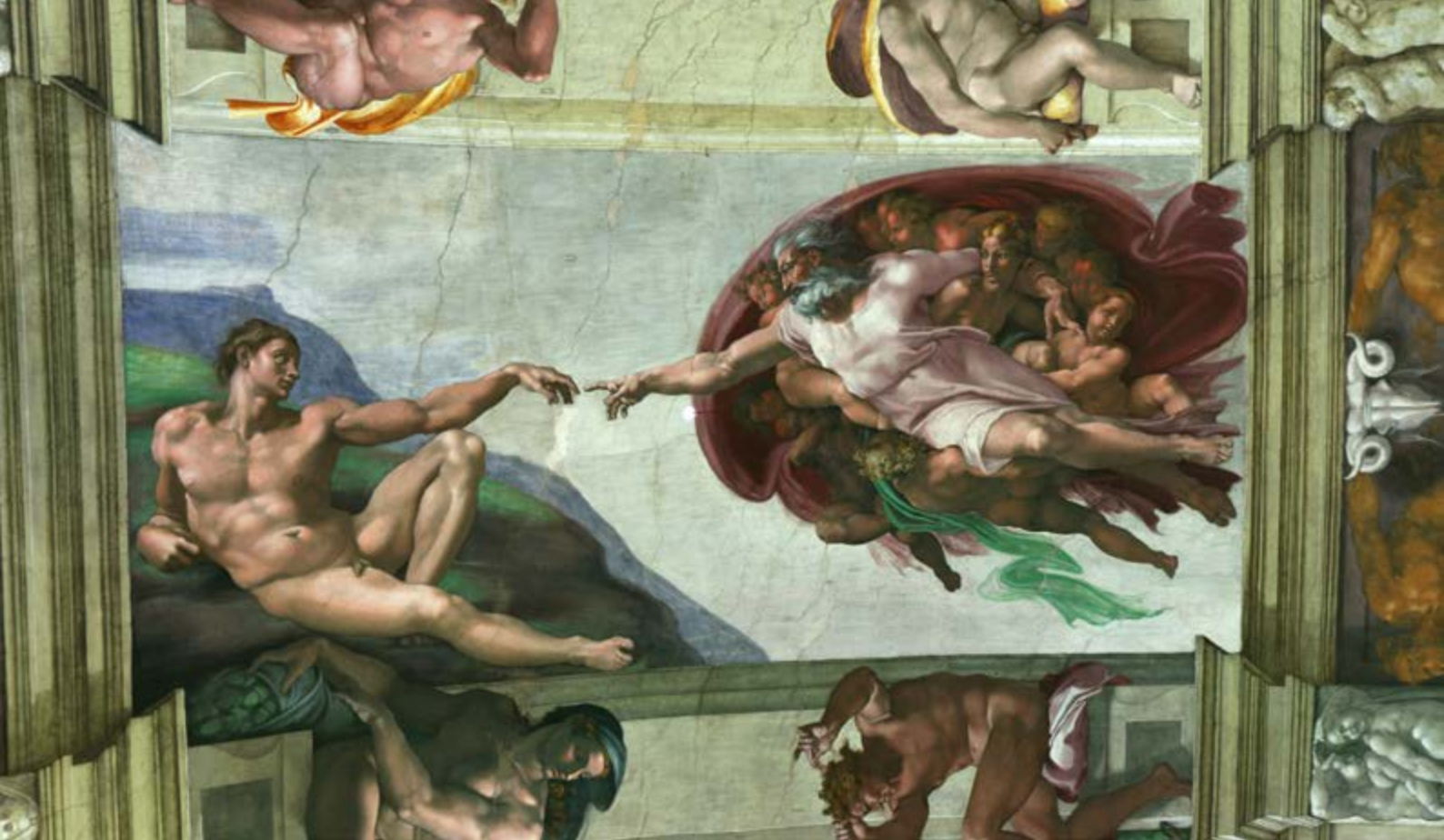


Immagine acquisita dal laser Scanner ENEA RGB-ITR.

Io sono convinta che l'opera d'arte non potrà mai essere sostituita da un medium digitale che in qualche modo vuole replicarla o emularla. Quindi il digitale è sicuramente utile, ma non sostituisce la visita reale. Tuttavia, nella fase acuta della pandemia il digitale ha avuto un ruolo fondamentale perchè ci ha permesso di andare comunque avanti, di continuare a lavorare e di arrivare alle persone, attraverso il web e i canali social. Grazie al digitale, abbiamo potuto proseguire la nostra missione di trasmettere e condividere la storia, l'arte e la fede che sono dietro le nostre collezioni.

**È vero che nel momento del lockdown più stretto avete avuto un picco di accessi?**

Sì, nei mesi in cui siamo stati chiusi, nel 2020 e all'inizio il 2021, il sito e i contatti ai nostri canali social sono stati incredibili. Per questo non sono assolutamente contraria al digitale, anzi, ne riconosco tutte le potenzialità, ma è chiaro che deve essere usato con equilibrio e raziocinio; nel nostro caso, ad esempio, ha un enorme valore come mezzo per entrare all'interno delle nostre collezioni e approfondirne la conoscenza a beneficio di coloro che non riescono a venire di persona.

**“In questi ultimi decenni l'attenzione verso le tecnologie applicate alla conservazione e al restauro è decisamente cresciuta,,**

**La ricerca scientifica offre tecnologie sempre più avanzate, strumentazioni e procedure di eccellenza per il restauro, la conservazione, valorizzazione e fruizione del patrimonio culturale. Qual è il rapporto fra ricerca e arte nei Musei Vaticani?**

Io dico sempre di essere molto fortunata, perchè quando sono arrivata ho trovato una realtà di eccellenza, il Gabinetto di ricerche scientifiche, creato nel 1940 e oggi diretto dal professor Ulderico Santamaria, con professionisti e scienziati di alto livello che lavorano su ogni aspetto della conservazione, del restauro e della manutenzione delle nostre collezioni. A livello internazionale siamo sicuramente considerati un istituto di ricerca di riferimento in campo di conservazione e re-

stauro e anche per tutto quanto quello che riguarda la manutenzione, a partire da quella generale, la preventiva integrata, fino all'areazione, la climatizzazione ma anche alla depolveratura degli ambienti di controllo, di quelli espositivi e di deposito, dove si trova ben il 75% delle collezioni.

**Si fa abbastanza per trasferire i risultati della ricerca dai laboratori alla tutela e valorizzazione del patrimonio culturale o si potrebbe fare di più? E come eventualmente?**

In questi ultimi decenni l'attenzione verso le tecnologie applicate alla conservazione e al restauro è decisamente cresciuta e la realtà è molto diversa rispetto a 30-40 anni fa. Oggi partiamo da ottime basi, anche se poi, ovviamente è anche una questione di mezzi a disposizione. C'è stato un innalzamento delle professionalità in questo campo ed è stata molto sviluppata l'innovazione tecnologica nel settore della manutenzione e della condivisione del nostro patrimonio storico-artistico. Oggi ci sono università che formano in conservazione dei beni culturali, sono previsti master specifici in queste discipline e sicuramente l'"asticella" è sempre più alta.

## **“I privati hanno e possono avere un ruolo fondamentale nella tutela del patrimonio culturale,,**

**A suo giudizio sono necessari incentivi al settore privato per accrescere gli investimenti nella salvaguardia dei beni culturali?**

In Vaticano da circa 35 anni abbiamo un gruppo molto esteso di "Patrons of the art", ovvero un gruppo internazionale e anche un gruppo italiano di sostenitori delle nostre collezioni e delle nostre attività, prevalentemente di restauro, che ci supportano e ci aiutano per tanti progetti. Devo dire che nel momento della pandemia, quando non abbiamo più potuto contare su uno dei nostri grandi punti di forza, le entrate dei visitatori, il loro aiuto è stato essenziale. Quindi i privati hanno e possono avere un ruolo fondamentale nella tutela del patrimonio culturale. Nel nostro caso siamo veramente molto grati perché in

questi due anni ci hanno permesso di affrontare tante difficoltà.

**Adesso che la pandemia sembra allontanarsi e comunque si va verso una fase discendente, qual è l'iniziativa, il sogno che le piacerebbe realizzare nei musei anche all'insegna di una fase nuova che si apre di speranza e di fiducia?**

Abbiamo tante potenzialità e tanti progetti su molti fronti, per adesso un po' congelati da una situazione che richiede prudenza. Comunque posso anticipare che ci saranno iniziative per il bicentenario di Antonio Canova, una figura molto importante non solo come scultore, ma per la sua visione dei musei moderni. Prima, però, dobbiamo uscire da un contesto economico complicato e poi, sicuramente, metteremo in agenda tante iniziative, mi auguro già a partire dall'estate. In generale, mi piacerebbe vedere il Museo più fruito e visitato: adesso il sabato abbiamo un po' più di pubblico, ma in settimana a livello di visite private siamo tornati indietro di 35 anni.

**Un'ultima domanda sull'importanza di preservare e portare alle generazioni future il patrimonio culturale. Avete un quadro di quanti giovani visitano i Musei Vaticani? E come accrescere l'interesse dei giovani per i musei e, in generale, per arte e cultura?**

Ad oggi siamo un museo assolutamente giovanissimo e ho in mente tante idee e strategie per accrescere ancora il loro interesse. Da questo punto di vista i social sono stati uno strumento molto positivo, che ci ha consentito di decuplicare la presenza di giovani, soprattutto dopo il primo lockdown. Dal giugno 2020, per tutta l'estate fino alla chiusura autunnale, abbiamo avuto un'affluenza importante di ragazzi sotto i trent'anni, anche perché avevamo lavorato moltissimo con i social network, con Instagram, con gli influencer, col nostro sito e con l'ufficio stampa per avvicinare il pubblico giovanile. Io ho dei figli che vanno dai 18 ai 30 anni e incredibilmente frotte di loro amici sono venuti alla riapertura dopo il primo lockdown: a un certo punto era quasi diventato virale frequentarci, perché si era sviluppata la necessità di fruire del "bello" e dei valori sostanziali e spirituali che sono dietro la bellezza e che sono dentro le nostre collezioni.



# Per i beni culturali è fondamentale investire su innovazione&imprese



Intervista con Nicola Zingaretti, *Presidente della Regione Lazio*  
A cura di Laura Moretti

**Tutela, conservazione, valorizzazione del patrimonio culturale occupano uno spazio importante nell'agenda della Regione Lazio che, secondo il Rapporto "IO SONO CULTURA 2021" di Symbola e Unioncamere è la prima in Italia, insieme alla Lombardia, per ricchezza prodotta con la cultura. Tutto ciò grazie anche all'opera del Distretto Tecnologico per i beni e le attività Culturali (DTC), nato nel 2017 per mettere insieme ricerca e industria e sviluppare tecnologie innovative di recupero e fruizione dei beni culturali. Partendo da queste premesse abbiamo chiesto al Presidente Zingaretti quali sono stati i successi, ma anche le criticità di questi anni, le prossime sfide e gli investimenti per il patrimonio culturale dal suo insediamento nel 2013 ad oggi.**

Complessivamente possiamo stimare investimenti per la riqualificazione di tutti luoghi e strutture culturali del Lazio per più di 65 milioni di euro, in grandissima parte di risorse ordinarie del bilancio. Un impegno finanziario e amministrativo eccezionale, con il quale abbiamo avviato i lavori strutturali per innovare e migliorare la fruibilità di musei, biblioteche, archivi e istituti culturali, complessi monumentali, aree archeologiche, dimore e giardini storici. Va segnalato anche il grande lavoro svolto per la valorizzazione del patrimonio dei centri urbani storici delle realtà più fragili e marginali rappresentate dai piccoli comuni del Lazio. La scelta di operare investimenti strutturali importanti in questo settore ha assunto una particolare rilevanza in questo ultimo biennio caratterizzato dalla crisi sanitaria ed economica. Abbiamo immesso ossigeno nel tessuto produttivo rappresentato dalle molteplici tipologie di aziende

e di liberi professionisti coinvolti: ad esempio imprese edili o informatiche, così come ingegneri, architetti etc. Va inoltre considerato che progetti con finalità di riqualificazione delle strutture culturali hanno anche importanti ricadute sotto il profilo della crescita e innovazione sociale e culturale delle comunità locali.

## **Può farci qualche esempio?**

In particolare vorrei citare due progetti messi in campo. Il primo, in parte finanziato dalla Regione attraverso i fondi messi a disposizione dalla Legge per la promozione del libro e della lettura, è "MeMo - Memory of Montecassino": un sistema informativo digitale integrato ispirato ai più avanzati modelli internazionali attraverso cui è stato preservato e reso fruibile digitalmente l'immenso patrimonio di manoscritti, documenti, incunaboli medievali conservati nell'Abbazia. Il secondo è "Lazio Antico. Atlante del Lazio meridionale", progetto realizzato dalla Regione con la collaborazione del Dipartimento di Scienze dell'Antichità della Sapienza Università di Roma: una mappatura digitale completa dei beni e dei siti archeologici riferibili al periodo tra il IX secolo a.C. e il VI secolo d.C. nel territorio laziale a sud del Tevere che è divenuta una piattaforma digitale in cui la memoria del Lazio e i suoi resti materiali sono stati ordinati nello spazio e nel tempo e riuniti in un'unica presentazione della storia urbana e rurale della nostra Regione.

**Nel Lazio come in tutte le altre Regioni italiane, il tessuto imprenditoriale e delle professioni che gravitano attorno al settore cultura è fatto di real-**

**tà molto piccole e qualche volta anche poco tecnologiche. Che risposte avete avuto da queste micro-realtà rispetto alle opportunità e agli incentivi resi disponibili?**

Investire sulle nuove tecnologie, sulla creatività e l'intraprendenza del nostro tessuto imprenditoriale è fondamentale per dare nuovo slancio all'economia che gravita intorno al settore della cultura. Puntare sul rinnovamento tecnologico di queste realtà vuol dire scommettere con ancora più convinzione sulla bellezza e sulle eccellenze del Lazio. Per questo motivo, assieme al MIUR, la Regione Lazio ha costituito il Distretto Tecnologico del Beni e delle Attività Culturali del Lazio. Stiamo investendo oltre 60mln di euro per mettere in rete università, centri di ricerca, industrie culturali e creative, imprese innovative e digitali, Comuni e altri enti pubblici e privati titolari di musei, complessi monumentali, parchi archeologici, biblioteche, archivi e altri beni culturali. Il DTC è divenuto in questi anni una delle più grandi Infrastrutture europee dedicate alla valorizzazione dei beni culturali, e si integra con le altre attività avviate in questi anni. Penso al progetto "Impresa fa Cultura" con cui abbiamo dato sostegno a 48 progetti innovativi proposti da 65 tra micro, piccole e medie imprese per la valorizzazione dei Luoghi della Cultura attraverso le nuove tecnologie, o alla Digitalizzazione dello Spettacolo e delle altre Attività Culturali dal Vivo. Il connubio tra patrimonio artistico e tecnologie è una delle grandi opportunità per creare nel Lazio e in Italia lavoro di qualità e sviluppo.

**“c'è bisogno di un maggior coordinamento fra pubblico e privato perché si vengano a creare soggetti industriali autonomi e competitivi a livello globale,,**

**Si parla spesso della necessità di dar vita ad un'alleanza pubblico-privata per il patrimonio culturale. Lei che idea si è fatto in merito?**

Vorrei rispondere con due esempi molto concreti, altrimenti si rimane sempre su terreno dei grandi principi e su discussioni astratte. L'alleanza tra pubblico e privato è invece una strada da percorrere nella pratica, perché porta ad aumentare l'offerta culturale, a valorizzare

i nostri beni, in alcuni casi addirittura a salvarli. Il primo esempio è quello che riguarda le dimore e dei giardini storici: nel Lazio abbiamo approvato nel 2016 una legge regionale che prevede attività e contributi per la valorizzazione dei beni accreditati. Beni che spesso i privati non riuscivano a mantenere, e che con l'aiuto della Regione sono stati valorizzati e aperti al pubblico.

**“Investiti oltre 65 milioni di euro per riqualificare tutti i luoghi e le strutture culturali del Lazio,,**

La Rete delle Dimore storiche del Lazio oggi comprende oltre 170 luoghi. I soggetti proprietari dei luoghi accreditati possono richiedere annualmente un contributo per la valorizzazione del loro immobile. Proprio in questi giorni è uscito il nuovo bando che rifinanzia lavori di ristrutturazione, ma anche per la progettazione o l'acquisto di attrezzature, allestimenti e arredi.

**“potenziare l'insegnamento delle materie scientifiche nelle scuole e nelle università,,**

**E il secondo esempio?**

È la Campagna istituzionale Art Bonus, ormai lanciata sei anni fa con lo scopo di valorizzare e promuovere il Patrimonio storico-artistico, individuando alcuni beni prioritari che potessero essere preservati dal degrado e restituiti a nuova vita, attraverso interventi di riqualificazione e animazione attraverso un ampio palinsesto di attività espositive e iniziative culturali. Attraverso la Campagna Art Bonus, siamo riusciti a dare una nuova prospettiva al Castello di Santa Severa, all'edificio ex GIL, ora WeGIL, un hub di creatività giovanile nel cuore di Trastevere. Abbiamo recentemente incluso nel programma di valorizzazione un sito di eccezionale importanza storica, artistica e civile, ossia la Torre Medievale del borgo di Palidoro, situata in un contesto di grande valenza naturalistica del litorale laziale e sede suggestiva del memoriale di Salvo d'Acquisto.

Ecco, questi due esempi mostrano una strada da se-

quire, perché produce ricchezza, occasioni sociali e sviluppo per l'intera comunità.

**“Il connubio tra patrimonio artistico e tecnologie è una delle grandi opportunità per creare lavoro di qualità e sviluppo,,**

**ENEA sta portando avanti diversi progetti finanziati dalla Regione, dieci dei quali sostenuti dal DTC, per interventi che vanno dal biorestauro alle tecnologie avanzate per la ricerca archeologica in acque interne e marine, dalle tecniche di isolamento sismico per le opere d'arte alla mappatura di siti e aree specifiche con sistemi robotici. Che importanza hanno ricerca scientifica e innovazione tecnologica nella tutela, conservazione e fruizione dei beni culturali?**

Negli ultimi anni la Regione Lazio ha fatto passi da gigante nella cooperazione tra sistema della ricerca e sistema museale. Questi due ambiti sono diventati inscindibili per il benessere delle comunità, la nostra è una terra d'arte ed è ormai diventata anche centro di innovazione scientifica e di produzione di cultura ad altissimo livello, e questo lo dobbiamo proprio alla capacità di progettare in modo integrato. Oltre ai 10 progetti dell'Enea, abbiamo recentemente raddoppiato i fondi stanziati per cofinanziare altri 22 progetti che coinvolgono 100 soggetti tra cui 57 dipartimenti universitari e istituti non solo dell'ENEA, ma anche del CNR e dell'INFN, 33 imprese e 10 Titolari di Luoghi della Cultura. I 22 Progetti si aggiungono ai 13 già approvati con uno stanziamento complessivo doppio rispetto al previsto, di circa 5,5 milioni di euro. Questi non sono solo numeri, si tratta di una vera e propria iniezione di vitalità per il tessuto sociale ed economico della regione, all'interno dei progetti saranno banditi almeno 50 assegni e borse di ricerca per i giovani ricercatori del Lazio e questo vuol dire dare possibilità in più ai tanti giovani che vogliono applicarsi nella ricerca.

**Perché è importante stanziare questi fondi?**

Perché sia i grandi musei statali che i musei regiona-

li, comunali e universitari del Lazio hanno bisogno di co-progettazione con gli Istituti di ricerca per sviluppare la loro attività di tutela, valorizzazione e fruizione. I comuni stessi stanno mettendo insieme reti territoriali di musei legati al patrimonio e si stanno creando reti strategiche utili per la collaborazione con il mondo della ricerca. Allo stesso tempo, anche i grandi musei e le sovrintendenze possono fruire delle innovazioni prodotte dal sistema della ricerca come dimostra l'adesione al bando ricerca e sviluppo di tecnologie per il patrimonio a cui hanno partecipato tutti i più importanti musei del Lazio a partire dal Colosseo e tutte le sovrintendenze.

**“L'alleanza pubblico-privato è una strada da percorrere nella pratica,,**

**Lei ha dichiarato che non esiste nel mondo un'area geografica come il Lazio, nella quale la forza della scienza convive con la ricchezza del patrimonio culturale, storico, artistico e ambientale.**

Il Lazio è un territorio incredibile, estremamente vivace e ricco di menti brillanti. Questo patrimonio va assolutamente incentivato e preservato. Al bando per la valorizzazione dei siti culturali del Lazio hanno partecipato oltre 600 luoghi della cultura e sono stati approvati più di 50 progetti che raggruppano 217 tra musei e siti archeologici. La qualità delle progettualità è stata veramente alta, per questo contiamo di chiudere la seconda fase con l'erogazione di quasi 50 milioni di euro entro il 2022. I vantaggi di questa azione di governo sono molti.

**“Nel Lazio passi da gigante nella cooperazione fra sistema della ricerca e sistema museale,,**

**Oggi digitalizzare il patrimonio culturale significa sicuramente migliorarne la fruizione dando anche la possibilità di raggiungere un pubblico più ampio e diversificato. Quali altri vantaggi e quali criticità ritiene possano esserci per la divulgazione grazie all'applicazione delle ICT?**

Per quanto riguarda le ICT, oltre agli strumenti che migliorano la fruizione, come realtà virtuale, realtà immersiva, ologrammi interattivi, ci sono altre attività legate che possono contribuire a rendere ancora più poliedrico il sistema culturale del Lazio, ad esempio l'ecodigitalizzazione dei beni e del patrimonio culturale, la digitalizzazione e l'archiviazione dei beni culturali, l'utilizzo di software di modellazione architettonica e di prodotto, algoritmi di analisi e classificazione, le reti neurali per rischio sismico, o i test di procedure automatizzate per la modellazione 3D.

Tutte cose che solo 10 anni fa sembravano un miraggio. Gli svantaggi sono difficili da trovare: chi diceva che i musei virtuali scoraggiavano i visitatori "in presenza" è stato smentito dai fatti e si è dimostrato che le due versioni museali possono coesistere senza danneggiarsi a vicenda, al contrario sono una ricchezza.

**“Chi diceva che i musei virtuali scoraggiano le visite in presenza è stato smentito dai fatti,”**

**Un'ultima domanda. Il PNRR prevede 4,275 miliardi di investimenti per la cultura, più i 1,460 miliardi del Piano Strategico Grandi attrattori culturali per finanziare 14 interventi di tutela, va-**

**lorizzazione e promozione culturale. Ritiene che siano sufficienti per fare del nostro capitale culturale una leva di sviluppo e ripartenza economica del Paese?**

Il PNRR è uno strumento importantissimo per lo sviluppo del sistema Paese e il Lazio rappresenta un tassello fondamentale: nella nostra Regione ha sede la Capitale di Italia con i suoi innumerevoli beni, ma la ricchezza del territorio è variegata e fatta di molte sfaccettature che abbracciano cultura, ambiente, cibo e tanto altro ancora. Gli ambiti di intervento sono di natura economica e sociale e, in particolare dopo due anni di pandemia, i settori in cui immettere risorse sono molti. Oltre alla cultura, si va dalla sanità, alle imprese, dal sociale al commercio, per questo la progettazione degli interventi da realizzare con il Piano di ripresa e resilienza è così articolata. I fondi destinati agli interventi in ambito culturale sono fondamentali e costituiscono l'avvio di un progetto strategico sulla valorizzazione culturale che prende spunti anche dall'esigenza di trasformare le best practices regionali in piani infrastrutturali nazionali che rendano l'Italia un paese di punta non solo per le tecnologie, ma anche per l'attrattività verso i turisti culturali con sistemi di prenotazione e fruizione all'avanguardia. La strada la stiamo tracciando e la progettazione messa in campo lo dimostra.

# La diagnosi energetica di edifici di pregio storico-artistico

Riguardo agli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica, l'unicità di ogni edificio storico non consente di delineare formule e soluzioni universali. L'esperienza di ENEA nell'ambito dell'analisi di edifici storici della Pubblica Amministrazione consente di evidenziare le problematiche più comuni e gli interventi di efficienza energetica più facilmente attuabili e convenienti, anche in considerazione delle esigenze di tutela e conservazione dei beni stessi.

DOI 10.12910/EAI2022-018

di Francesca Caffari, Nicolandrea Calabrese, Marco Morini, *Laboratorio efficienza energetica negli edifici e sviluppo urbano, ENEA*

**E**ffettuare la diagnosi energetica di un edificio storico è un processo complesso, che si scontra con numerosi ostacoli: **dalla mancanza di documentazione tecnica alla difficoltà di conoscere adeguatamente il sistema edificio-impianto, fino alla proposta di interventi migliorativi che non compromettano i caratteri identitari degli edifici e incontrino il parere favorevole delle Soprintendenze.** L'ENEA negli ultimi anni si è confrontata spesso con questa tematica, grazie alle collaborazioni avviate con Amministrazioni Pubbliche per le diagnosi energetiche di edifici di grande rilevanza a Roma, come il Policlinico Militare del Celio, i Palazzi Montecitorio, San Macuto, Baracchini e Caprara. Il processo seguito da ENEA per le diagnosi energetiche è quello dettagliato nel rapporto tecnico UNI/TR 11775:2020, che costituisce una linea guida nazionale per l'applicazione della norma europea UNI CEI EN 16247-2:2014.

## Gli ostacoli tecnici e autorizzativi

La prima difficoltà è data dalla **carenza di documentazione tecnica,**

molto spesso esclusivamente cartacea, che obbliga i tecnici a ricostruire planimetrie ed alzati tramite appositi rilievi. È necessario inoltre acquisire più informazioni possibili sulla genesi e l'evoluzione degli edifici tramite **ricerche archivistiche ed approfondite indagini storiche,** che possono contribuire a ricostruire la natura dei materiali impiegati e le stratigrafie dei componenti, se necessario grazie al confronto con edifici analoghi. Vista l'impossibilità di operare indagini distruttive sulle murature perimetrali, il modo migliore per la corretta individuazione delle caratteristiche termofisiche degli elementi edilizi è il ricorso a **misurazioni strumentali con tecniche non intrusive, quali la termografia e la termoflussimetria.** Un'ulteriore difficoltà comunemente riscontrata negli edifici analizzati è legata alla presenza di impianti datati, in cui è difficile trovare sistemi di contabilizzazione e monitoraggio dei consumi utili alla ripartizione tra i diversi servizi energetici (riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, illuminazione, ecc...). Tale problematica rende in-

dispensabile un **accurato inventario energetico** che tenga conto dei dati prestazionali delle apparecchiature installate e dei profili di utilizzo e, se possibile, di misurazioni strumentali, per poter suddividere in maniera realistica il consumo complessivo ed eventualmente validare le simulazioni effettuate tramite software.

Le problematiche legate all'efficientamento energetico sono anche dovute alla necessità di far fronte alle esigenze di tutela e conservazione espresse nel **Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio (d.lgs. 42/2004).** Per gli edifici soggetti a vincolo, infatti, ogni tipo di intervento di ristrutturazione è subordinato alla preventiva autorizzazione del Ministero, tramite le Soprintendenze (art. 21), cui spetta il compito di valutare caso per caso gli interventi realizzabili e quelli in conflitto con le esigenze conservative. È quindi opportuno che i tecnici si confrontino, già in fase di diagnosi, con gli enti competenti per definire la fattibilità delle soluzioni proposte, mentre le pratiche autorizzative saranno avviate in fase di progettazione.



Fig. 1 Palazzo Baracchini (foto-raddrizzamento). Fonte: ENEA

### Interventi migliorativi

**Riguardo agli interventi di miglioramento dell'efficienza energetica, l'unicità di ogni edificio storico non consente di delineare formule e soluzioni universali.** Tuttavia, sulla base dell'esperienza delle diagnosi effettuate da ENEA è possibile fare delle considerazioni sulle soluzioni generalmente realizzabili, in considerazione dei vincoli esistenti sugli edifici nonché degli aspetti legati a costi e benefici<sup>1</sup>.

**Involucro:** le pareti massive che caratterizzano l'edilizia storica possiedono generalmente spessori elevati e trasmittanze termiche migliori rispetto alle pareti di tamponamento non isolate di edifici costruiti in epoche più recenti. Per esempio, quella misurata, grazie all'utilizzo di un termoflussimetro, per le murature in tufo spesse 80 cm dei padiglioni del Policlinico del Celio (fine '800) è di 0,78 [W/m<sup>2</sup>K], mentre una comune doppia parete in laterizio di 30 cm con intercapedine d'aria ha una trasmittanza di circa 1,25 [W/m<sup>2</sup>K]. Se si considerano l'impossibilità di isolare dall'esterno un edificio di pregio e tutte le problematiche relative all'eventuale isolamento dall'interno (difficoltà di correggere i ponti termici, diminuzione della superficie

utile, presenza di elementi decorativi di pregio, ecc...), è evidente che qualsiasi intervento di coibentazione difficilmente risulterà conveniente sotto il profilo costi-benefici. Meno problematico e più vantaggioso risulta invece l'isolamento interno dei solai di copertura, soprattutto se adiacenti a locali sottotetti.

Per quanto riguarda i serramenti, in quasi tutti i casi analizzati presentano caratteristiche prestazionali inadeguate rispetto ai parametri normativi. L'intervento di sostituzione, quando

possibile, porta generalmente ad un considerevole risparmio energetico ma i tempi di ritorno risultano lunghi per l'elevato costo degli elementi da sostituire. In presenza di serramenti storici di particolare pregio si potrebbe valutare la possibilità di apporre pellicole basso emissive (come ipotizzato nelle diagnosi dei palazzi Montecitorio e San Macuto) o di installare un secondo serramento all'interno per non alterare l'estetica delle facciate.

**Impianti:** è importante che i sistemi di riscaldamento e raffrescamento all'interno degli edifici storici, soprattutto se caratterizzati dalla presenza di elementi decorativi di pregio, siano correttamente progettati e garantiscano delle condizioni termo-igrometriche interne che, oltre al benessere degli utenti, contribuiscano alla tutela dei beni culturali stessi. Gli edifici storici sono spesso caratterizzati da impianti obsoleti e poco efficienti, installati nel corso di ristrutturazioni che hanno adeguato i fabbricati alle attuali destinazioni d'uso. Il rendimento complessivo degli impianti può essere facilmente migliorato con interventi quali l'introduzione di sistemi di termorego-



Fig. 2 Padiglioni del Policlinico Celio. Fonte: ENEA



Fig. 3 Palazzo Montecitorio. Fonte:Vlad Lesnov, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=52990589>

lazione (ad esempio, valvole termostatiche sui radiatori), il controllo dei differenti circuiti di distribuzione e la sostituzione dei generatori di calore inefficienti. Un contributo importante all'ottimizzazione della gestione degli impianti negli edifici storici è costituito inoltre dall'adozione di sistemi BACS, che aiutano a regolare l'energia fornita in funzione dell'effettiva domanda e a monitorare le condizioni di comfort interno.

Negli edifici analizzati, l'assenza di sistemi di regolazione e la presenza di tecnologie obsolete caratterizza anche gli impianti di illuminazione, con lampade fluorescenti spesso sempre accese. **L'installazione di sensori di presenza e la sostituzione delle lampade esistenti con corpi illuminanti del tipo a LED sono interventi che**

**permettono di risparmiare significativamente con investimenti contenuti.**

**Fonti rinnovabili: una tematica complessa è infine quella che riguarda l'installazione di pannelli solari termici e fotovoltaici.** Non a caso il d.lgs 28/2011 esclude (art. 11, comma 2) gli edifici tutelati ai sensi del d.lgs 42/2004, nel caso di ristrutturazioni rilevanti, dagli obblighi relativi all'utilizzo di fonti rinnovabili. Già in fase di diagnosi è opportuno il confronto con la Soprintendenza per l'individuazione delle soluzioni attuabili, evitando l'alterazione dei volumi edificati (nel caso di inserimento sui tetti l'allegato 3 del d.lgs 28/2011 precisa che i pannelli fotovoltaici o solari termici devono essere disposti con *«la stessa inclinazione e lo stesso orientamento della falda»*) e

della percezione dei materiali, non limitandosi al mero rispetto di norme e regolamenti.

Nella diagnosi dei palazzi Baracchini e Caprara, ad esempio, è stato proposto il posizionamento di pannelli fotovoltaici sulla copertura piana, schermati dal muretto d'attico perimetrale, così come ammesso dalla circolare della Soprintendenza Capitolina ai Beni Culturali del giugno 2016. Rispetto alla proposta di intervento, la Soprintendenza statale si è riservata la possibilità di richiedere lievi modifiche (ad esempio, inclinazione di pannelli con angolo prossimo all'orizzontale, uso di un colore più vicino a quello della copertura). La pensilina con pannelli di silicio amorfo proposta nella diagnosi del Policlinico del Celio a copertura dell'area archeologica della

Tab. 1 Interventi e tempi di ritorno

Intervento	Tempi di ritorno (anni)			
	Montecitorio	San Macuto	Baracchini e Caprara	Padiglioni Policlinico Celio
Sostituzione infissi				50
Pellicole basso-emissive	21	36		
Coibentazione copertura	18	13	15	
Coibentazione sottotetto				7
Termoregolazione	1	4		4
Sostituzione generatore		11		5
Sostituzione pompe di circolazione	8	12		11
BACS			6	3
Installazione LED		10	7	9

Basilica Hilariana rappresenta, invece, un esempio di soluzione architettonica e impiantistica integrata per la tutela e valorizzazione del bene culturale.

La Tabella 1 elenca alcuni degli interventi proposti da ENEA nei casi citati con i relativi tempi di ritorno (TR). Questi dipendono da molteplici fattori (in primis, il consumo di partenza valutato ed il costo dei vettori energetici) e risultano confrontabili in edifici con la stessa destinazione d'uso: in generale, gli interventi sugli impianti sia termici che elettrici sono i più convenienti (TR ≤ 12). Si tratta

di interventi standard, raccomandati in quanto poco invasivi e di semplice attuazione. Tuttavia, per risolvere problematiche specifiche, potrebbe essere opportuno **valutare soluzioni specialistiche e innovative**, in grado di rispondere alle esigenze tecniche, spaziali ed estetiche che le caratteristiche di pregio e unicità degli edifici storici impongono.

Si ritiene importante precisare che quanto valutato e sintetizzato in tabella 1 è stato calcolato con i costi unitari dei vettori energetici (energia elettrica e gas metano) anno 2021.

La situazione attuale, fortemente condizionata dalla crisi Russia-Ucraina, è caratterizzata da costi dei vettori energetici quasi raddoppiati: è evidente che puntare sull'**efficienza energetica dei numerosi edifici di pregio storico-artistico** presenti in Italia è la strada principale da percorrere per questo tipo di edifici, a supporto dell'obiettivo posto di **indipendenza energetica Nazionale**, a prescindere dai tempi di ritorno dei vari interventi realizzabili.

*Per info: [andrea.calabrese@enea.it](mailto:andrea.calabrese@enea.it)*

1. Un utile riferimento sono le Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale. Architettura, centri e nuclei storici ed urbani del MiBACT (2015).



# Approcci innovativi al restauro: l'esperienza del progetto ES-PA

Un approccio integrato e sostenibile nella gestione dei territori passa anche attraverso la conservazione e valorizzazione del patrimonio storico-culturale. Nell'ambito del progetto Energia e sostenibilità per la pubblica Amministrazione (ES-PA), è stata messa al servizio della P.A. locale l'esperienza dell'ENEA nello studio, definizione e sperimentazione di soluzioni di 'restauro sostenibile', innovative e ambientalmente compatibili come strategia di conservazione, protezione, valorizzazione e fruizione del patrimonio culturale.

DOI 10.12910/EAI2022-019

di Laura Migliorini, *Responsabile del coordinamento del Progetto ES-PA, Servizio Management Progetti di Innovazione - ENEA*

**Il progetto Energia e sostenibilità per la pubblica Amministrazione (ES-PA) nasce nel 2017<sup>1</sup> come risposta alle esigenze espresse dalle Amministrazioni regionali e locali di sviluppare iniziative a sostegno di una corretta ed efficiente progettazione e gestione delle azioni ricadenti negli ambiti della programmazione comunitaria dei fondi strutturali. L'innovatività del progetto consiste nell'offrire alle amministrazioni strumenti per rafforzare le loro competenze tecniche, e non solo quelle amministrative, per una più efficace azione di policy sui territori sui temi dell'energia e della sostenibilità, con un'attenzione particolare allo sviluppo di processi virtuosi per la transizione verso l'economia circolare. Un rafforzamento qualitativo e quantitativo che può contribuire a rendere la PA più motivata e ad incentivare il trasferimento di innovazione nei processi di sviluppo locale, supportando inoltre la predisposizione e attuazione di progetti speciali. Per raggiungere pienamente questi obiettivi, l'esperienza sviluppata dall'ENEA, ha consentito di mettere a**

**punto un modello di gestione dei territori, attraverso un approccio integrato e partecipato allo sviluppo sostenibile.** I progetti integrati territoriali per lo sviluppo sostenibile, inseriti in ESPA, focalizzandosi sulla rigenerazione urbana, l'uso efficiente delle risorse, la riqualificazione e valorizzazione del patrimonio storico-edilizio e il turismo sostenibile, oltre a rafforzare le competenze locali su tali temi, favoriscono la nascita di nuove filiere produttive legate ai principi dell'economia circolare, attraverso l'applicazione di soluzioni tecnologiche, metodologiche e di governance innovative.

**Il 'Restauro sostenibile' come strategia di conservazione, tutela, valorizzazione e fruizione del patrimonio culturale**

Al centro dell'azione, le città e il territorio limitrofo, gestiti come un sistema complesso, formato da sotto-insiemi, tra loro collegati, nei quali si inserisce la tematica del 'Restauro sostenibile', come strategia di conservazione, protezione, valorizzazione e fruizione del

patrimonio culturale. Proprio su tale tema, una riflessione sviluppata con gli esperti del settore del biorestauro ha evidenziato la necessità dei restauratori e di coloro che dirigono e gestiscono monumenti e beni artistici di avviare un confronto costante con il mondo della ricerca, al fine di sperimentare tecnologie innovative nei processi di restauro e conservazione e stimolare così un cambiamento nel modus operandi per la salvaguardia delle ricchezze artistiche del nostro Paese.

La collaborazione con Matera, città pilota per i progetti integrati di sviluppo sostenibile del progetto ES-PA, ha fatto da apripista per una metodologia di lavoro e di interscambio nuova, partecipata e che conduce a risultati e valutazioni immediate. In particolare, la Scuola di Alta Formazione e Studio di Matera (SAF), afferente all'Istituto Superiore Centrale del Restauro, ha ospitato un ciclo di seminari tecnici organizzati dall'ENEA sul tema della sostenibilità del restauro, nella cui progettazione vengono coinvolte le realtà territoriali.

Al fine di dare la massima diffusione



del know-how esistente, sono stati organizzati:

- workshop di impronta scientifica su aspetti sia teorici che pratici di approcci e prodotti innovativi per il biorestauro;
- incontri a carattere divulgativo rivolti alla P.A e mirati a presentare ai funzionari pubblici l'esistenza di possibilità innovative concrete, che permettono di pianificare politiche ambientali e culturali sostenibili;
- eventi di impronta pratica con il coinvolgimento degli stakeholder locali;

Agli incontri hanno partecipato studenti e docenti del settore Beni Culturali, la Pubblica amministrazione, le direzioni museali, i restauratori, e i rappresentanti delle realtà produttive del territorio. E' stata condivisa l'esperienza maturata in ENEA nella ricerca di nuovi prodotti e procedure per la conservazione dei

beni culturali, presentando le ultime innovazioni in materia di tecnologie per la biopulitura, bioconsolidamento e disinfezione e della diagnostica di precisione per il biodeterioramento, con l'obiettivo di dimostrare i vantaggi nella riduzione o completa sostituzione dei prodotti tossici in uso con prodotti non aggressivi verso le opere, privi di tossicità per la salute e ambientalmente compatibili.

Gli incontri hanno previsto sessioni pratiche, veri e propri Training on the job, sviluppati in conformità all'intento del Progetto ES-PA di rendere Matera un laboratorio urbano di interesse scientifico e in grado di richiamare nuove professionalità interessate ad esportare esperienze simili in altre aree mediterranee. Con questo obiettivo sono stati selezionati insieme alla Scuola Alta Formazione di Matera opere su cui intervenire: affreschi, materiali lapidei, dipinti murali, prevedendo una

applicazione sul campo di interventi innovativi di trattamento e biopulitura.<sup>2</sup>

### Da Matera a Bari, un modello replicabile in molte realtà

Sono seguiti inoltre sopralluoghi con i restauratori per individuare siti di interesse su cui svolgere ulteriori prove dimostrative

I feedback ricevuti sono stati molto positivi, non solo per l'efficacia delle soluzioni tecniche proposte, ma soprattutto per la metodologia utilizzata, un'azione di sistema che, nello spirito del progetto ES-PA, va a considerare tutti gli aspetti di una **governance multilivello**, quali:

- la molteplicità degli attori coinvolti ai diversi livelli territoriali;
- il livello tecnico delle tematiche affrontate in termini di progettazione, stato dell'arte delle tecnologie, valutazione delle performance e dei risultati;

- la necessità di informazioni e bisogni condivisi per orientare correttamente gli interventi;
- la valorizzazione da parte dei decisori pubblici delle professionalità e dei centri di competenza specifica;
- l'armonizzazione delle procedure amministrative con la pianificazione degli interventi tecnici necessari e relativi investimenti;
- l'esigenza di coniugare gli interventi di conservazione e riqualificazione dei beni artistici con gli aspetti di valorizzazione e di fruizione degli stessi da parte dei cittadini;

**L'esperienza positiva di collaborazione con la città di Matera ha consentito di confermare la replicabilità del modello e proporre la progettazione e implementazione di iniziative similari ad altre realtà territoriali.**

Perseguendo l'obiettivo del progetto ESPA di mettere a disposizione prodotti e servizi a tutte le amministrazioni regionali e locali, si è instaurata una collaborazione con **la Direzione Generale dei Musei della Puglia e con il Castello Svevo di Bari, al fine di sperimentare applicazioni innovative su bassorilievi e manufatti artistici selezionati.**

Tale esperienza ha confermato non solo l'efficacia delle tecnologie proposte, ma

soprattutto il grande valore aggiunto prodotto dall'interscambio quotidiano tra i ricercatori, i responsabili della tutela dei beni artistici, le amministrazioni e i restauratori.

**Infatti, un approccio condiviso al restauro sostenibile rende possibile un accesso diretto e consapevole alle tecniche innovative da parte degli addetti ai lavori, la cui esperienza diventa fondamentale nelle fasi di sperimentazione e apre la strada ad un modo nuovo di pensare e operare negli interventi di conservazione e riqualificazione dei beni artistici.**

Dunque, la transizione verso prodotti e pratiche sostenibili dal punto di vista ambientale, sociale ed economico rappresenta la sfida da affrontare per un nuovo approccio al restauro e alla conservazione dei Beni Culturali, in conformità alle politiche Europee.

L'esperienza del progetto ESPA mostra che un approccio integrato allo sviluppo sostenibile ha la potenzialità di sviluppare filiere innovative di professionalità e di produzioni che vengono direttamente dai territori, come per esempio l'utilizzo di materiali derivanti da scarti agronomici autoctoni e ogni altro processo che attraverso la chimica verde conduce verso **tecnologie di restauro con un basso impatto sull'ambiente, consentendo al contempo di**

**conservare i nostri beni artistici per le generazioni future, in linea con le strategie di sviluppo economico sostenibile.**

Le strategie di governance utilizzate consentono di stimolare la domanda dai territori, favoriscono la collaborazione tra ricerca e organismi istituzionali, una corretta comunicazione e divulgazione degli interventi ai cittadini e l'utilizzo di procedure e strumenti per incentivare la fruizione dei beni artistici, per rendere le tecnologie innovative facilmente accessibili e promuovere lo sviluppo del mercato di prodotti 'verdi'. Allo stesso tempo, gli strumenti conoscitivi ed operativi resi disponibili attraverso il progetto ESPA e diffusi a tutte le amministrazioni regionali e territoriali, insieme alle azioni di accompagnamento messe in campo, consentono di rafforzare le capacità amministrative e tecniche in termini di selezione degli obiettivi, valutazione dei benefici delle diverse opzioni, individuazione di interventi specifici e verifica dell'effettiva sostenibilità degli interventi, gettando solide basi per una programmazione efficiente delle azioni e delle risorse finanziarie che i territori saranno chiamati a gestire nella nuova politica di coesione 2021-2027<sup>3</sup>.

*Per info: [laura.migliorini@enea.it](mailto:laura.migliorini@enea.it)*

1. Finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionale 2014-2020

2. E' possibile consultare il report completo degli incontri di Matera "La sostenibilità nel restauro: stato dell'arte, applicazioni e prospettive future Training on the job" e il materiale tecnico alla pagina web: <https://www.espa.enea.it/progetti-integrati/matera-e-il-suo-territorio/prodotti-e-servizi-matera.html>

# Curare le opere d'arte con l'estratto di liquirizia

Contro il biodeterioramento che colpisce le opere d'arte, i ricercatori dell'ENEA hanno messo a punto una tecnica innovativa, basata sull'utilizzo dell'estratto di foglie di liquirizia. Questa procedura applicata alle statue dei giardini dei Musei Vaticani, nel Battistero del Castello di Santa Severa, sui manufatti lapidei conservati alle Terme di Diocleziano e sulle pareti della Domus Aurea evita l'utilizzo di sostanze chimiche altamente tossiche e aggressive e ha progressivamente conquistato la fiducia e la collaborazione di Soprintendenze e storici del monumento.

DOI 10.12910/EAI2022-020

di Flavia Tasso e Giada Migliore, *Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima - ENEA*

**I**l Biodeterioramento è definito come *“l'insieme dei cambiamenti indesiderati, causati dalle normali attività degli organismi viventi, delle proprietà dei materiali di importanza economica, culturale e storica”*<sup>1</sup>. I microorganismi svolgono un ruolo ormai ampiamente riconosciuto nella degradazione dei beni culturali causando danni fisico-chimici, estetici e strutturali.

**Per la lotta ai biodeteriogeni nel restauro e nella conservazione del patrimonio artistico trovano ampio impiego sostanze chimiche che, sviluppate per altri scopi, sono efficaci e a basso costo.** In particolare, i biocidi comunemente utilizzati per contrastare e contenere lo sviluppo di film biodeteriogeni (“biofilm”, vedi box) sono a base di sali di ammonio quaternario e carbammati che destabilizzano struttura e permeabilità delle membrane cellulari. **Si tratta di composti altamente tossici, difficilmente biodegradabili e aggressivi sui materiali.** Inoltre, questi principi attivi, inducendo resistenza negli organismi bersaglio, stanno perdendo

progressivamente la loro efficacia e devono essere utilizzati in quantità crescenti o con intervalli sempre più brevi tra i trattamenti.

Attualmente, quindi, prioritaria è la necessità di trovare **alternative “verdi” che soddisfino i criteri di sostenibilità e superino i problemi legati ai prodotti di sintesi.** La sfida è quella di **sviluppare metodi più sicuri e sostenibili nel restauro e nella conservazione del patrimonio culturale utilizzando prodotti e pratiche che tengano conto degli aspetti ambientali, sociali ed economici, come confermato da molteplici iniziative a livello europeo coordinate dall'Agenzia Chimica Europea (ECHA<sup>2</sup>).** Negli ultimi anni, è cresciuto l'interesse per lo sviluppo di **nuovi biocidi bio-based** e, in particolare, per lo sfruttamento di **fitoderivati, fitoestratti ed oli essenziali** come biocidi in molti campi applicativi, quali alimentazione, medicina e industria farmaceutica.

Gli estratti vegetali esprimono attività biocida attraverso principi attivi e metaboliti secondari che interfe-

riscono con specifiche vie metaboliche, attivano o inattivano enzimi essenziali o alterano le membrane e le strutture dei microrganismi. La loro efficacia contro i comuni agenti patogeni umani (batteri, funghi e lieviti) è ormai nota, ma solo più recentemente è stata sperimentata la loro attività antimicrobica contro i microrganismi associati al biodeterioramento di archivi, biblioteche, musei e monumenti lapidei<sup>3</sup>.

## La nascita di un estratto vegetale dalle proprietà biocide

Dal 2016 il gruppo di **Biotecnologie microbiche del Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima sta collaborando con l'azienda tedesca Trifolio-M<sup>4</sup>**, leader nella produzione di prodotti fitosanitari a base di estratti vegetali, per saggiare la possibilità di impiego della liquirizia (*Glycyrrhiza glabra* L.) come biocida da utilizzare nel settore dei beni culturali. Le numerose proprietà delle radici di liquirizia sono conosciute fin dai tempi antichi:

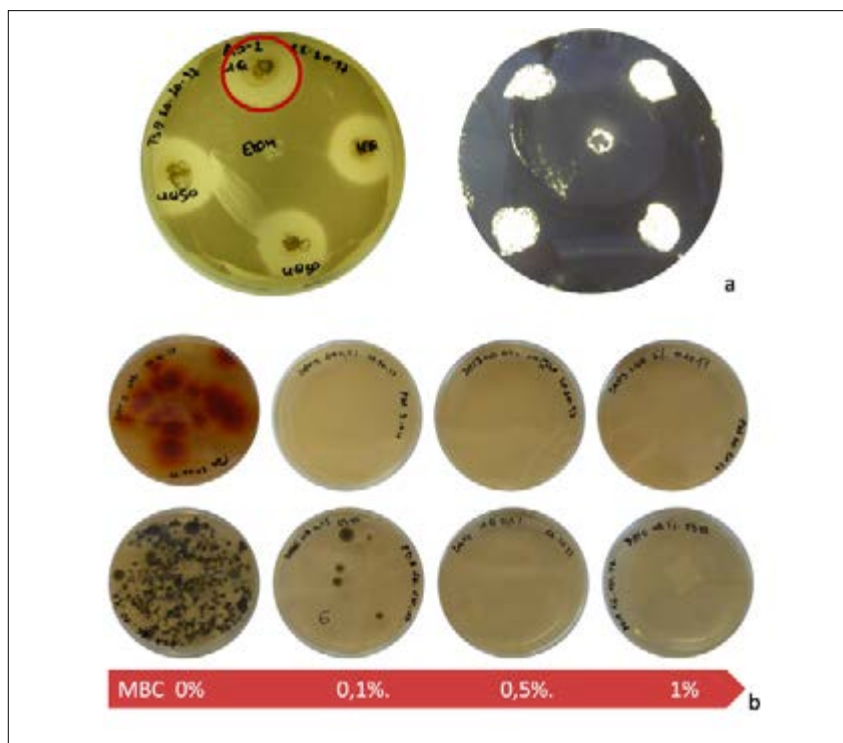


Fig. 1 Test su piastra per la valutazione dell'azione antimicrobica dell'estratto di liquirizia. a) Agar well-diffusion method: l'efficacia è valutata sulla base dell'alone di inibizione della crescita dal punto di applicazione della sostanza. b) Test per definire la concentrazione minima di sostanza che può inibire la crescita di un microrganismo (MIC, Minimum Inhibitory Concentration) o ucciderlo (MBC, Minimum Biocidal Concentration). Si nota come per i due ceppi fungini rappresentati la concentrazione efficace sia differente.

contengono composti polifenolici, flavonoidi e isoflavonoidi che sono sintetizzati e accumulati dalla pianta in risposta alle infezioni microbiche ed hanno numerose azioni positive, tra cui quella antisettica, antinfiammatoria ed antiossidante.

Pur essendo meno conosciute di quelle delle radici, le proprietà degli estratti ottenuti dalle foglie di liquirizia non sono meno importanti: sono stati dimostrati effetti antimicrobici su patogeni clinici mostrando talora un'efficacia maggiore rispetto agli estratti di radice, contro *Bacillus subtilis*, *Candida albicans* e *Staphylococcus aureus*<sup>5</sup>.

L'estratto alcolico di liquirizia in uso nel laboratorio OEM nasce dalla ricerca di Trifolio-M, che ha trasformato e nobilitato le foglie, prodotto

di scarto della lavorazione della radice della liquirizia, in una risorsa utile

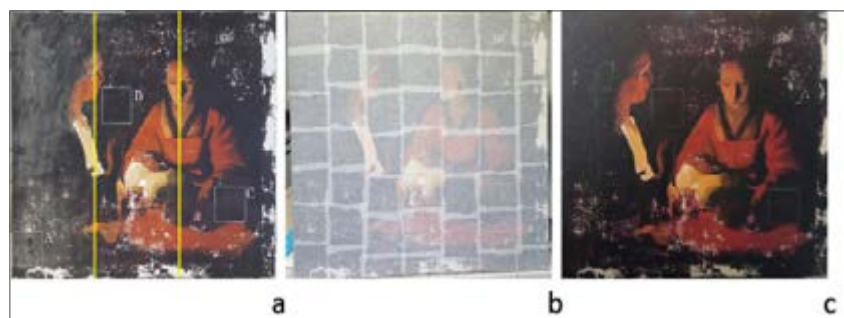


Fig. 2 Copia dipinta da L. De Gasperis di "Le Nouveau-Né" di Georges de La Tour. a) l'opera prima dell'intervento di pulitura. Sono evidenti i segni di alterazione dovuti all' attacco microbico. Sono ben identificabili tre aree, quella a sinistra (A) con una patina diffusa e omogenea, quella centrale (B) con un attacco moderato e quella a destra (C) in cui non sono visibili segni di alterazione della superficie pittorica. b) Opera durante l'applicazione dell'estratto di liquirizia. L'estratto è stato applicato a pennello con interposta carta giapponese e lasciato in posa over-night. c) l'opera a distanza di 4 anni dal trattamento di pulitura. La superficie pittorica risulta priva di patine biologiche.

per l'agricoltura stessa. I ricercatori della Trifolio-M, infatti, hanno dimostrato con successo l'efficacia dell'estratto alcolico da foglie contro l'infezione da *Pseudoperonospora* nel cetriolo e ne hanno caratterizzato la composizione chimica attribuendo l'attività biocida a tre flavonoidi, pinocembrina, glabradina e licoflavone<sup>6</sup>.

Il laboratorio OEM, sulla base di questi risultati, ha pensato di sfruttare il potenziale biocida dell'estratto di foglia di liquirizia contro i biofilm che deteriorano il patrimonio culturale. Nella prima fase di ricerca, che si è svolta in laboratorio, sono stati scelti come target ceppi batterici e fungini isolati da siti archeologici e storici, ipogei ed epigei, e mantenuti nella collezione microbica in-house ENEA-MIRRI, una banca di ceppi microbici che comprende circa 1500 microrganismi, tra batteri, funghi, alghe e virus<sup>7</sup>. I ceppi batterici selezionati per lo screening appartengono ai phyla che più comunemente sono considerati responsabili del biodeterioramento dei monumenti in pietra, come i Firmicutes e gli Actinobacteria, per i batteri, e i generi *Cladosporium*, *Penicillium* ed *Aspergillus*, per i funghi.

L'efficacia dell'estratto di liquirizia è



Fig. 3 Domus Aurea, Parco Archeologico del Colosseo, Roma. a) Le pareti e le volte mostrano una significativa colonizzazione di film biodeteriogeni complessi b) 2017 - interventi iniziali su frammenti di reperti affrescati applicati in maniera reversibile alle pareti e trattati in laboratorio c) 2021 - applicazione mediante lancia telescopica di una miscela sperimentale a base di estratti vegetali in una sala della Domus Aurea.

stata valutata mediante test di laboratorio che si basano sulla diffusione della sostanza in esame nel terreno solido di crescita microbica precedentemente inoculato con i microrganismi scelti ("Disk and Agar Well diffusion methods"<sup>8</sup>). L'efficacia è espressa come diametro (in mm) dell'alone di inibizione della crescita microbica dal centro del punto di applicazione della sostanza (Fig.1a). L'estratto ha mostrato un pattern di efficacia nei confronti dei ceppi batterici testati in linea con la letteratura sul meccanismo di azione antimicrobica dei flavonoidi: i batteri gram-negativi sono più resistenti dei gram-positivi a causa della composizione della parete.

L'efficacia sui ceppi fungini è complessivamente ridotta rispetto a quella sui batteri e molto variabile anche all'interno dello stesso genere. L'estratto è risultato efficace contro *Cladosporium*, *Epicoccum* e *Aspergillus* mentre *Penicillium* e *Fusarium* si sono rivelati resistenti. Stabilita l'efficacia dell'estratto, sono stati fatti test in fase liquida per definire la concentrazione minima efficace in termini di azione inibitoria (MIC, Minimum Inhibitory Concentration) e biocida (MBC, Minimum Biocidal Concentration), cioè la concentrazione minima di sostanza che può inibire la crescita di un microrganismo o ucciderlo. Questi esperimenti hanno individuato un range di concentra-

zione compreso tra lo 0,1 e l'1% (v/v) per batteri e funghi (Fig. 1b).

Questa fase è molto importante perché l'individuazione della minima concentrazione efficace permetterà di ridurre al minimo la concentrazione di estratto da impiegare nelle successive applicazioni in situ, **garantendo l'azione biocida, minimizzando gli eventuali effetti collaterali, con vantaggi relativi alla valutazione del rischio per operatori e fruitori e di tipo economico.**

#### Dal laboratorio all'opera

Per poter passare dal "bancone" di laboratorio all'applicazione sull'opera è necessaria un'ulteriore fase di sperimentazione, da svolgere su provini o copie che riproducano, non solo la problematica (contaminazione microbica), ma anche le condizioni operative, ad esempio il materiale da trattare, lo stato di alterazione di matrici e superfici etc. Questo passaggio è essenziale per ottimizzare le condizioni applicative (ad esempio, concentrazione dell'estratto, modalità e tempi di posa) al fine di ottenere i migliori risultati e escludere o minimizzare gli effetti collaterali.

Le prime applicazioni di estratto di foglie di liquirizia sono state effettuate in laboratorio su una copia de "Il neonato" di Georges de La Tour dipinta nel 2000 con tempera all'uovo su tela industriale bianca (Fig.2a).

Durante un precedente restauro nei laboratori dell'Accademia di Belle Arti de l'Aquila, il dipinto era stato foderato con pasta fiorentina e stuccato con gesso e con colla animale. Questo rivestimento, realizzato con materiale organico, in combinazione al luogo di conservazione dell'opera, che non garantiva le condizioni microclimatiche più corrette, ha indotto un esteso attacco microbico della superficie anteriore e posteriore del dipinto.

La tipologia e il grado di attacco sono stati analizzati mediante microscopio digitale con luce visibile e UV e sono state identificate tre aree classificate a seconda dell'attacco microbico (Fig. 2a). L'indagine, che si è concentrata sulla componente coltivabile della comunità microbica, sia batterica che fungina, ha permesso di rilevare una distribuzione peculiare dei microrganismi sull'opera.

Nell'area in cui l'attacco era più forte ed evidente (A) sono stati isolati solo ceppi fungini appartenenti ai generi *Arthrimum*, *Aspergillus* e *Penicillium*, mentre nell'area a moderata contaminazione (B) sono stati isolati 5 ceppi batterici, tutti appartenenti al genere *Bacillus* ed un solo ceppo fungino, *Cladosporium cladosporioides*. Nell'area apparentemente priva di patine microbiche (C), non sono stati trovati microrganismi coltivabili

**Tra i microrganismi identificati, i più dannosi per l'opera erano *C. cladosporioides*, per la capacità di degradare carbossimetilcellulosa, xilano e lignina, attraverso il rilascio di xilanasi, *Penicillium ed Aspergillus*, per la loro capacità di precipitare carbonato di calcio, di produrre acidi corrosivi e precipitare ossidi di ferro, gel amorfi e ossalati.**

Prima di procedere al trattamento con estratto di foglie di liquirizia, sono stati condotti test preliminari di efficacia su piastra sui ceppi microbici isolati; l'estratto è stato poi applicato su tasselli di prova, per

fugare eventuali alterazioni del materiale o del colore e per valutare il tempo minimo di applicazione, che è risultato tra le 4 e le 24 ore.

A questo punto l'intero dipinto è sta-

to pulito con l'estratto di liquirizia (Fig.2b). L'effetto antimicrobico è stato monitorato nel tempo, dimostrando che, oltre all'attività biocida, l'estratto di foglie di liquirizia ha

un effetto batteriostatico e inibisce la ricolonizzazione dell'opera d'arte anche dopo quasi 4 anni (Fig.2c).

Questo è stato solo l'inizio di un'esperienza di ricerca che, negli ulti-

## I biofilm nel deterioramento dei Beni culturali

Il **biodeterioramento** di rocce monumentali e resti archeologici è un processo complesso in cui intervengono ed agiscono sinergicamente fattori fisici, chimici e biologici.

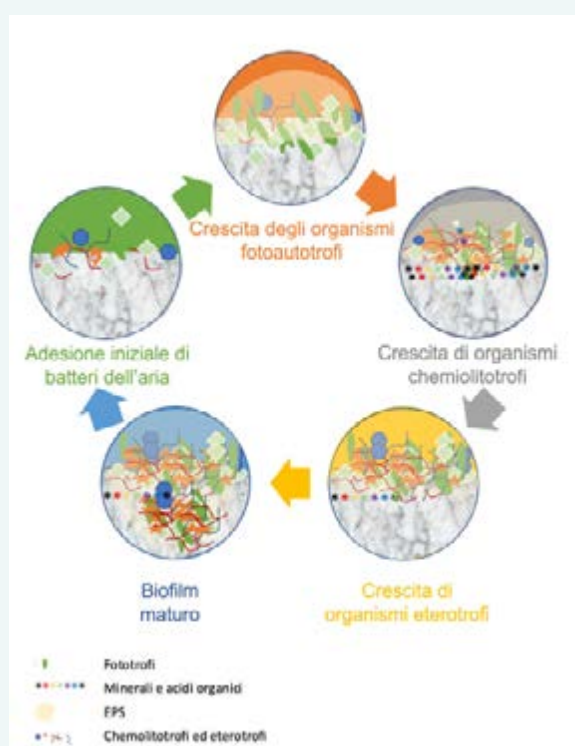
Gli agenti atmosferici rendono la superficie più porosa e incoerente favorendo la deposizione di particelle atmosferiche inquinanti che, a loro volta, accelerano la perdita di coesione e la desquamazione del materiale lapideo e forniscono un terreno di crescita ottimale per diversi tipi di organismi biodeteriogeni. La formazione di un biofilm deteriogeno può comportare un danno al bene di tipo puramente estetico, o chimico, dovuto alla secrezione di enzimi, acidi inorganici e organici e di sostanze che solubilizzano i minerali del substrato, o meccanico, se la crescita microbica induce uno stress fisico e rotture.

La formazione di un biofilm si realizza mediante una "Successione ecologica": su matrici prive di materia organica si insediano microrganismi pionieri litofili, fotoautotrofi e chemiolitotrofi, mentre su superfici con quantità molto piccole di materia organica si insediano microrganismi oligotrofi eterotrofi, quali batteri, attinomiceti e funghi. Lo sviluppo e la morte di successive generazioni di microrganismi, insieme all'accumulo di composti azotati e fosfati atmosferici, arricchisce la pietra di materia organica e di fattori di crescita essenziali, permettendo il successivo sviluppo di altri microrganismi eterotrofi (Fig. box).

Infine, con il progressivo peggioramento delle condizioni fisiche di superficie, si instaurano condizioni che permettono l'impianto e la germinazione di spore di crittogame fino ai semi di piante superiori e si stabilisce una microfauna specializzata molto adattabile.

Le attività metaboliche e la successione di diversi gruppi microbici danno luogo ad una comunità microbica complessa con dominanza di microrganismi eterotrofi, tra cui batteri e funghi, immersi in una matrice di sostanze polimeriche extracellulari (EPS), come polisaccaridi, lipidi, proteine, acidi nucleici, pigmenti ed enzimi, che ricoprono e collegano le cellule per formare un biofilm stabile. Il biofilm fornisce vantaggi a tutti i microrganismi che lo abitano: migliora l'adesione al substrato, protegge dall'essiccazione e dalla predazione, media il trasferimento di sostanze nutritive tra le specie, così come l'intrappolamento di particelle trasportate dall'aria contenenti composti organici e inorganici. I **biofilm** maturi hanno un'architettura stabile e la capacità biochimica di amplificare il biodeterioramento di vari materiali. Inoltre, **conferiscono ai microrganismi una maggiore resistenza ai composti biocidi.**

La comprensione dei processi di biodeterioramento delle opere d'arte del patrimonio culturale richiede un monitoraggio a lungo termine per evitare conclusioni fuorvianti e perché la comunità microbica è soggetta a variazioni legate ai cambiamenti stagionali, ai cicli vitali delle singole specie e alle molte strategie di sopravvivenza.



mi anni, ha permesso la realizzazione di numerosi studi e applicazioni dell'estratto di liquirizia su vari materiali e in svariati siti storici ed archeologici, che vanno dai Giardini dei Musei Vaticani, al Battistero del Castello di Santa Severa, ai manufatti lapidei conservati alle Terme di Diocleziano, sede del Museo Nazionale Romano, al Parco del Colosseo<sup>9</sup>. Tra tutti, il caso-studio forse più prestigioso ed importante, che continua tuttora, è quello effettuato nella Domus Aurea di Roma.

Le pareti e le volte mostrano una significativa colonizzazione di biofilm complessi (Fig. 3a) che, nel corso degli anni, sono stati trattati con benzalconio cloruro e coformulati

commerciali. Questi prodotti hanno portato allo sviluppo di resistenze e si stanno rivelando sempre meno efficaci, richiedendo applicazioni sempre più ravvicinate.

#### La collaborazione con Soprintendenze e storici del monumento

La collaborazione con i funzionari della Soprintendenza e gli storici del monumento è stata fondamentale non solo per realizzare importanti esperimenti volti a testare l'efficacia e le molteplici modalità di applicazione dell'estratto da solo e in formulazione con diversi oli essenziali<sup>10</sup> ma anche perché ha permesso al mondo della ricerca di incontrare e confron-

tarsi con chi è impegnato nella gestione e nella tutela del patrimonio artistico.

In questi anni abbiamo osservato e, forse nel nostro piccolo, contribuito ad alimentare un cambiamento nella gestione e conservazione del patrimonio culturale e un'apertura verso la ricerca e l'innovazione: mentre prima i funzionari erano scettici e cauti e rispondevano alle nostre richieste di provini con piccoli frammenti di pochi cm<sup>2</sup> (Fig. 3b), ora sono loro che ci propongono nuove sfide e ci forniscono intere stanze su cui testare i nostri prodotti (Fig.3c).

Per info: [flavia.tasso@enea.it](mailto:flavia.tasso@enea.it), [giada.migliore@enea.it](mailto:giada.migliore@enea.it)

1. Hueck, H.J. The Biodeterioration of Materials as a Part of Hylobiology. *Material und Organismen*, 1965, 1, 5-34.
2. <https://echa.europa.eu/>
3. Barresi G., Cammarata, M., Palla F. Biocide. In *Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage*; Palla, F., Barresi, G., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017; pp. 49–65
4. <https://www.trifolio-m.de/en/>
5. Irani, M., Sarmadi M., Bernard F., Ebrahimi G.H., Ebrahimi G.H., Bazarnov H.S. Leaves antimicrobial activity of *Glycyrrhiza glabra* L. Iran. J. Pharm. Res. 2010, 9, 425–428.
6. Scherf A., Treutwein J., Kleeberg H., Schmitt A. Efficacy of leaf extract fractions of *Glycyrrhiza glabra* L. against downy mildew of cucumber (*Pseudoperonospora cubensis*). *Eur. J. Plant Pathol.* 2010, 134, 755–762.
7. <https://sostenibilita.enea.it/news/microbial-resource-research-infrastructure-italian-node-mirri-it>
8. Mounyr Balouiri, Moulay Sadiki and Saad Koraihi Ibsouda. Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review, *Journal of Pharmaceutical Analysis*, 2015, 6 (2), 71-79.
9. Sprocati AR., Alisi C., Migliore G., Marconi P., Tasso F. (2020) Sustainable restoration through biotechnological processes: a proof of concept. In press in "Roles of microorganisms in heritage degradation and preservation" (E Joseph, P Junier eds.) Springer. ISBN 978-3-030-69411-1
10. Rugini L., Migliore G., Tasso F., Ellwood N.T.W., Sprocati A.R., Bruno L. Biocidal Activity of Phyto-Derivative Products Used on Phototrophic Biofilms Growing on Stone Surfaces of the Domus Aurea in Rome (Italy). *Appl. Sci.* 2020, 10, 6584. <https://doi.org/10.3390/app10186584>



# Il progetto SIS-DAT per la Simulazione dei Danni da Terremoto

Dagli anni '80 ENEA ha partecipato ai primi studi sismologici nazionali, inizialmente per il *siting* degli impianti nucleari e poi per la protezione dai terremoti dell'ambiente costruito. Nel tempo le sue competenze si sono estese anche a settori connessi alla valutazione del rischio quali l'ingegneria sismica, l'analisi macrosismica e la microzonazione sismica. Tali competenze costituiscono oggi un *unicum* nel panorama della ricerca di base e applicata sui terremoti.

DOI 10.12910/EAI2022-021

di Giacomo Buffarini, Salomon Hailemikael, Guido Martini, Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la prevenzione del rischio sismico e idrogeologico, ENEA

L'Italia ha un importante patrimonio culturale concentrato in numerosi centri storici di città e paesi localizzati in zone a media ed elevata sismicità. Molti di questi centri storici sono intensamente popolati e caratterizzati da un'elevata vulnerabilità del patrimonio edilizio allo scuotimento sismico. Quest'ultimo fattore, nel caso di eventi sismici anche di moderata magnitudo, accentua gli effetti calamitosi dello scuotimento, come testimoniato da quanto accaduto a seguito della sequenza sismica in Appennino Centrale del 2016-2017, per la quale si sono contate 299 vittime e le perdite economiche del patrimonio culturale sono state valutate in circa 2 miliardi di euro (fonte MibACT).

ENEA ha partecipato, sin dagli anni '80 del secolo scorso, ai primi studi sismologici nazionali, dapprima per il *siting* degli impianti nucleari e, successivamente per la protezione dell'ambiente costruito dai terremoti. Successivamente, le competenze ENEA si sono sviluppate anche in

altri settori connessi alla valutazione del rischio sismico quali: l'ingegneria sismica, l'analisi macrosismica e la microzonazione sismica.

Tali competenze, che costituiscono un *unicum* nel panorama della ricerca di base e applicata sui terremoti, sono state messe a servizio della mitigazione dal rischio sismico in diversi contesti: in progetti di ricerca collaborativi in ambito nazionale e internazionale; in attività di servizio per enti pubblici locali e a supporto delle attività di protezione civile.

Tra le esperienze più significative è possibile ricordare: le verifiche del danneggiamento di opere monumentali a seguito della sequenza sismica del Centro Italia; le verifiche di agibilità di edifici civili successivamente ai principali eventi sismici verificatisi nell'ultimo ventennio (2002 San Giuliano di Puglia, 2009 L'Aquila, 2012 Emilia, 2016-2017 Centro Italia, 2017 Ischia); gli studi di microzonazione sismica per la ricostruzione nell'area aquilana, a seguito del terremoto del 2009, e per la ricostruzione in Italia Centrale,

a seguito della già citata sequenza del 2016-2017; la partecipazione, in qualità di membro fondatore, alla costituzione del Centro di Microzonazione Sismica e le sue Applicazioni, associazione dei principali dipartimenti universitari ed enti di ricerca impegnati nella ricerca di settore; la partecipazione alle attività di rilievo macrosismico a seguito dei terremoti dell'Italia centrale del 2016-2017 e di Ischia, coordinate dal gruppo QUEST dell'INGV, con l'applicazione della Scala Macrosismica Europea EMS alla stima dell'intensità sismica, di cui ENEA ha curato, congiuntamente all'INGV, la versione italiana pubblicata nel 2019.

**Il progetto SIS-DAT, Sistema per la Simulazione dei Danni da Terremoto**

L'esperienza ENEA, unita alla rete di collaborazioni scientifiche sviluppata nel tempo, ha contribuito al successo della proposta di progetto SIS-DAT (Sistema per la Simula-



Fig. 1 La Torre Civica del Comune di Rieti (Sistema di monitoraggio dinamico di UNIRM1-DISG)

zione dei Danni da Terremoto) nel bando competitivo emesso dal DTC Regione Lazio (Distretto Tecnologico per le nuove tecnologie applicate ai beni e alle attività Culturali).

Il progetto, finanziato da Regione Lazio e MUR e coordinato dal Dipartimento di Scienze della Terra di Sapienza Università di Roma, vede la partecipazione di ENEA con il Dipartimento sostenibilità dei si-

stemi produttivi e territoriali e, in particolare, il Laboratorio tecnologie per la dinamica delle strutture e la prevenzione del rischio sismico e idrogeologico, del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica di Sapienza Università di Roma e di ALMA Sistemi Srl.

**Il progetto si pone l'obiettivo di implementare in un'unica piattaforma software in ambiente GIS, un'ap-**

**posita metodologia di analisi multidisciplinare per la produzione di mappe di danneggiamento atteso dei centri storici in relazione a predefiniti livelli di pericolosità sismica.** L'analisi combina: 1) informazioni geologiche e geotecniche, alla base di analisi di pericolosità sismica e di risposta sismica locale; 2) modelli di stabilità strutturale del bene architettonico singolo o di aggregati tipologici per la stima della vulnerabilità attraverso la valutazione della fragilità strutturale e 3) il ventaglio di possibili interventi di miglioramento sismico.

I vari aspetti trattati nel progetto (pericolosità, vulnerabilità, ipotesi di interventi) possono avere livelli di approfondimento diversi, tutti raggiungibili teoricamente, ma difficilmente realizzabili in pratica per limiti temporali ed economici.

**Scopo del progetto è predisporre il layout su cui implementare ciascun livello, in modo da poter usare lo strumento fornito anche qualora non sia possibile raggiungere l'approfondimento massimo in uno o più dei temi trattati.** Il centro storico selezionato come dimostratore è quello della città di Rieti dove, a fronte di un ricco patrimonio archeologico e monumentale collocato in un settore a media sismicità del territorio regionale, i partner del progetto hanno maturato approfondite esperienze di ricerca.

In particolare, il contributo di ENEA al progetto sarà orientato alla valutazione accurata ed omogenea della vulnerabilità sismica dell'edificio finalizzata alla stima del potenziale livello di danneggiamento del patrimonio culturale materiale, rappresentato sia da peculiari tipologie edilizie, quali le chiese e i palazzi storici, ma anche dell'edilizia ordinaria che caratterizza i centri storici. Le attività saranno orientate all'individuazione di un certo numero di tipologie edilizie e, per ciascuna delle quali si individueranno i parametri struttu-

rali essenziali per le analisi secondo i diversi livelli di dettaglio previsti.

### Uno strumento per gli stakeholder pubblici e privati

Il software sviluppato in SIS-DAT è orientato all'utilizzo sia degli stakeholder pubblici (MibACT, MIT, Dipartimento di Protezione Civile a livello Nazionale, Regionale e Comunale, Assessorati Regionali ed Uffici Tecnici Comunali per Urbanistica e Territorio, Soprintendenze ai beni archeologici e/o monumentali), sia privati (società di assicurazioni e studi professionali).

Difatti, lo strumento potrà consentire di evidenziare porzioni di tessuto urbano a diverso grado di vulnerabilità sismica, stabilendo così una gerarchia di priorità di interventi mirati alla tutela e messa in sicurezza dei beni culturali.

Lo sviluppo della piattaforma informatica è legato all'integrazione di metodologie di analisi innovative, al miglioramento di strumenti diagnostici e tecnologie d'intervento per la protezione e conservazione del patrimonio culturale materiale. Infatti, con la piattaforma proposta da SIS-DAT sarà possibile ipotizzare interventi di miglioramento strutturale che permetteranno di restituire scenari di danno atteso che tengano conto della potenziale riduzione della vulnerabilità sismica degli edifici.

Lo sviluppo dello strumento software e l'integrazione delle tecniche sviluppate nell'ambito del progetto sono di fondamentale importanza per la calibrazione e validazione dei modelli di stabilità strutturale e rappresentano una innovazione di prodotto con un importante impatto economico-sociale: difatti gli obiettivi ultimi di SIS-DAT sono la salvaguardia del patrimonio abitativo ma soprattutto la riduzione di perdite di vite umane nel



Fig. 2 Il Campanile della Cattedrale di Santa Maria Assunta di Rieti (Studiata da ENEA e UNIRM1-DISG)

#### caso di eventi sismici severi.

Gli interventi di miglioramento edilizio che potrebbero essere pianificati a seguito del progetto consentirebbero la conservazione del patrimonio culturale materiale ed una sua maggiore fruibilità presente e futura. Infine, è importante sottolineare sia come il

comparto edile eserciti un rilevante effetto traino sull'economia, sia come la riqualificazione dei centri storici possa valorizzare *asset* fondamentali per il Turismo.

*Per info: giacomo.bufferini@enea.it*



# Nuovi prodotti per la conservazione dei beni culturali

*Dal 2015 in Enea, nel centro della Casaccia, un gruppo interdisciplinare di ricercatori del Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali e del Dipartimento Fusione e Sicurezza Nucleare svolge attività di ricerca su prodotti di specie vegetali multifunzionali per la conservazione dei beni culturali. Si tratta dell'*Opuntia ficus-indica*, dalle cui pale si estrae una mucillagine che mescolata nell'impasto di preparazione delle malte le rende più durevoli nel tempo, e il *Capsicum* da cui si estraggono alcaloidi che hanno proprietà antimicrobiche e antimicotiche.*

DOI 10.12910/EAI2022-022

di Chiara Alisi, Laboratorio di Osservazioni e Misure per l'ambiente e il clima, Loretta Bacchetta, Laboratorio Bioprodotti e Bioprocessi - ENEA, Fernanda Falcon, Funzionario Restauratore, Sovrintendenza città dell'Aquila

**D**al 2015, nel centro ENEA della Casaccia, un gruppo interdisciplinare di ricercatori del Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali affiancato da due fisici del Dipartimento Fusione e tecnologie per la Sicurezza Nucleare svolge atti-

vià di ricerca su prodotti di specie vegetali multifunzionali per la conservazione dei beni culturali. Le specie vegetali prese in considerazione sono: l'*Opuntia ficus-indica*, dalle cui pale si estrae una mucillagine che mescolata nell'impasto di preparazione delle malte le rende più durevoli nel tempo,

e il *Capsicum* da cui si estraggono alcaloidi che hanno proprietà antimicrobiche e antimicotiche. Delle proprietà, dei metodi estrattivi, delle caratteristiche e del trasferimento al settore del restauro italiano si è ampiamente parlato nel libro "*Opuntia ficus-indica e Capsicum spp: prodotti sostenibili per*

*i beni culturali - Il progetto bilaterale Italia-Messico (2014-2020)*<sup>1</sup>, pubblicato dall'Enea nel 2021. Il volume riassume l'attività svolta nell'ambito della collaborazione bilaterale tra l'ENEA e El Colegio de Michoacán, Istituto di ricerca messicano, nell'ambito di Progetti di collaborazione bilaterale e di Progetti Grande Rilevanza promossi e cofinanziati dal Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale. Su tale testo e sulle pubblicazioni in esso indicate sono riportati tutti i risultati delle indagini svolte scopo di questo lavoro è sottolineare alcuni aspetti dell'attività di ricerca e documentare con una tabella aggiornata tutti gli interventi di restauro in cui sono stati applicati i bioprodotto NopalGel e NopalCap.

Il progetto è nato con l'intento di dare scientificità a quella che in Messico, già dal periodo preispanico, era un'applicazione empirica consistente nell'aggiunta della mucillagine estratta dai cladodi del fico d'india alla malta nella fase di mescolamento della calce con l'inerte. Tale preparazione veniva utilizzata per le malte di supporto dei dipinti murali, una delle forme d'arte più importanti della produzione artistica dei nativi messicani, che sono arrivate ai giorni nostri quasi inalterate. Oltre alla verifica sperimentale, il nostro intento è stato quello di trasferire questa applicazione al settore della conservazione italiano. La preparazione dei prodotti NopalGel e NopalCap come additivi nelle malte è brevemente descritta nelle fasi riportate in figura.

**Analisi chimiche fisiche per uno scale-up industriale del processo**

Analisi chimiche fisiche sono state realizzate per monitorare le rese e le caratteristiche dei diversi estratti anche ai fini di uno scale-up industriale del processo per lo sviluppo di un preparato che fosse di facile uso per i restauratori e gli operatori del settore [1].

Un obiettivo specifico dell'attività di ricerca è stato **individuare uno o più parametri in grado di misurare la durabilità nel tempo delle malte aeree**. Poiché tale proprietà risente di molte variabili, dalla tecnica di preparazione del materiale alla qualità e quantità dei prodotti di partenza, alle condizioni espositive e ai precedenti restauri, non esiste un parametro che sia in grado di misurarne la durabilità nel tempo. Si ricorre in questi casi a misure indirette legate ad alcune proprietà chimiche o fisiche del materiale in esame, la malta nel nostro caso, e a valutazioni effettuate in senso comparativo tra un campione e l'altro.

Il parametro misurato sui campioni preparati ad hoc è stata la **velocità di propagazione delle onde ultrasonore**, in quanto la velocità con cui tali onde attraversano un corpo dipende dalle sue caratteristiche elastiche e dalla sua densità. Fessurazioni, disomogeneità e vuoti riducono la velocità di propagazione del suono; la presenza della mucillagine nell'impasto di calce porta invece alla formazione di una struttura più ordinata, con meno vuoti; ciò è

stato misurato in senso comparativo tra campioni senza additivo vegetale e campioni con diverse concertazioni di mucillagine [2]. Questo effetto è dovuto sia alla presenza dei polisaccaridi che trattenendo l'acqua rallentano il tempo di presa della malta, sia alla presenza degli acidi galatturonici che si legano in una struttura ordinata con gli ioni calcio presenti nell'impasto di calce, inerte e acqua [3]. Nei campioni di malta aerea preparati con diverse concentrazioni di NopalGel e sottoposti a diversi cicli di invecchiamento per umidità e temperatura, si è misurato un aumento della velocità ultrasonora nelle percentuali comprese tra 1,25 e 5 % p/v. Tale risultato, verificato anche con il confronto con il test a compressione ci porta a dire che **la mucillagine rende più resistente la malta** [4].

L'efficacia del NopalCap come additivo nelle malte è stata ampiamente studiata nel lavoro di tesi di Sofia Schiattone e Natalie Iacopino [5] su provini prima e dopo processi di invecchiamento e di degrado artificiale, con misure di angolo di contatto,



Fig. 1 Preparazione dei prodotti NopalGel e NopalCap a partire dai cladodi di Opuntia e dai frutti di Capsicum.

**Tab. 1** Elenco di casi studio di interventi di restauro in situ effettuati durante i due progetti di Cooperazione bilaterale Italia Messico.

TIPO DI MANUFATTO	INTERVENTO	LUOGO	PRODOTTO	ESECUTORI	PERIODO
Mosaico a Ciottoli In esterno	Ripristino di stuccatura interstiziali del mosaico a ciottoli; Stuccatura in area depressa del manto musivo con probabilità di generare attacco biologico	Area archeologica di Mozia, Sicilia	NOPALGEL + Nhl e inerti; NOPALCAP + Nhl e inerti	ATI di Alessandra De Natale e Francesca Romagnoli	Ottobre 2020
Intonaco affrescato In interno	Consolidamento intonaco decoeso, circa 20 applicazioni per atomizzazione	Chiesa di San Costanzo Ronciglione (VT)	NOPALGEL + acqua di calce e 5g/lit urea;	Fernanda Falcon, Francesca Scirpa e Chiara Giuffrida	Aprile 2014
Pietra scolpita in esterno	Micro stuccatura superficie lapidea degradata per attacco biologico aggressivo	Chiesa di San Pietro a Coppito(AQ)	NOPALCAP + grassello calce e inerti ;	“Scimia Arte e Costruzioni SRL” e Fernanda Falcon	Marzo 2018
Intonaco , In interno	Ripristino intonaci	Battistero di Santa Severa (RM)	NOPALCAP + grassello calce e inerti	Consorzio Le Arti-Antonella Amoruso	2020
Muro di epoca romana In esterno	Superficie degradata per attacco biologico (biofilm di microorganismi, licheni e muschio)	Ambasciata USA- Roma	NopalCap come inibitore della crescita di biofilm complessi	Valeria Brunori	2019-2020
Dipinto su tela In interno	Stuccatura in fase di restauro Test sulle proprietà consolidanti sulla preparazione	Galleria Nazionale Arte Moderna (RM)	NOPALGEL + Colla storione e carbonato di calcio	Stefania D’Ottavio - TESI	2017
Pietra scolpita In esterno	Ripristino malta di stuccatura disgregata per esposizione agenti esterni	Conservatorio di Musica San Pietro a Majella, Napoli	NOPALCAP + Nhl e inerti	Lorenza Cardone - TESI	2019
Pavimento in opus sectile, In esterno Pietra di Lecce, In esterno	Ripristino di stuccature interstiziali del mosaico	Sito archeologico di Poggio Moscini, Bolsena (VT)	NOPALCAP + Nhl e inerti	Ilaria Cavaterra e Alessia Fusco- TESI	2019
Pietra di Lecce, In esterno	Stuccatura superficie lapidea degradata	Chiesa di San Giovanni Battista, Matera	NOPALCAP + grassello calce e inerti, NOPALCAP + Nhl e inerti	Natalie Iacopino Sofia Schiattone- TESI	2021

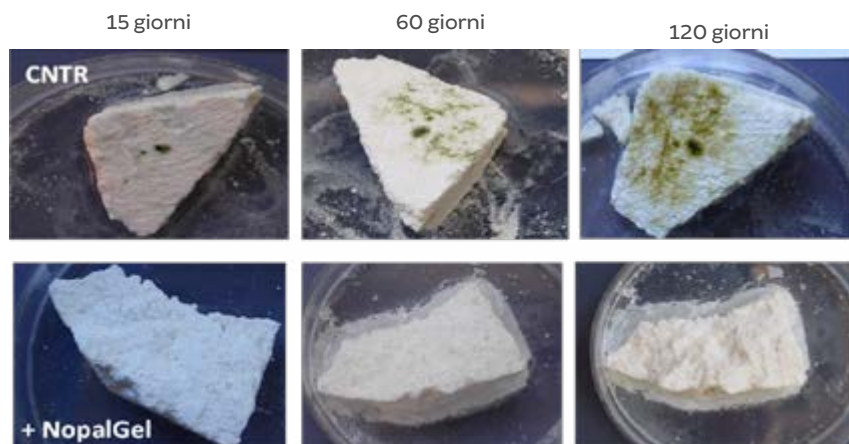


Fig. 2 Malta aerea di controllo e addizionata con Nopalgel

assorbimento d'acqua per risalita capillare, assorbimento d'acqua tramite spugnetta di contatto, indagini colorimetriche, drilling test e analisi di biorecettività.

**Un altro obiettivo della ricerca è stato quello di verificare che l'aggiunta nelle malte di una miscela di sostanze organiche, principalmente polisaccaridi, non desse luogo alla proliferazione di microrganismi con**

**possibili effetti negativi per le opere d'arte.** Si è valutata la biorecettività sui provini di materiali realizzati (malte aeree ed idrauliche [2]) o trattati (carte moderne ed antiche [6]) con i prodotti NopalGel e NopalCap: i risultati ottenuti hanno indicato un effetto inibente sulla naturale biorecettività dei materiali trattati. Grazie a questi risultati ottenuti su campioni di laboratorio, si è potuto procedere

ad applicare i prodotti negli interventi di restauro reali i cui principali sono elencati in tabella 1.

Tutti i casi riportati nella tabella 1 sono oggetto di un monitoraggio a lungo termine che ancora oggi dimostra l'efficacia e la validità degli interventi effettuati.

Oltre ai risultati scientifici ottenuti, la cooperazione Messico Italia ha contribuito a migliorare l'uso di risorse biologiche di interesse sia culturale che economico per i due Paesi, arricchendo il repertorio di prodotti per il restauro dei beni culturali, con materiali più rispettosi della salute dei restauratori, efficienti e allo stesso tempo a basso impatto ambientale. Inoltre, il riuso in Italia di scarti di potatura come le pale del fico d'india da cui estrarre al mucillagine, ha aiutato a minimizzare rifiuti della filiera, creando nuove opportunità per il territorio nell'ottica dei principi dello sviluppo sostenibile e dell'economia circolare.

*Per info: chiara.alisi@enea.it*

#### BIBLIOGRAFIA

1. <https://www.pubblicazioni.enea.it/le-pubblicazioni-enea/edizioni-enea/anno-2021/da-opuntia-ficus-indica-e-capsicum-spp-prodotti-sostenibili-per-i-beni-culturali-il-programma-bilaterale-italia-messico-2014-2020.html>.
2. Alisi, C.; Bacchetta, L.; Bojorquez, E.; Falconieri, M.; Gagliardi, S.; Insaurralde, M.; Martinez, M.F.F.; Orozco, A.M.; Persia, F.; Sprocati, A.R.; et al. Mucilages from Different Plant Species Affect the characteristics of Bio-Mortars for Restoration. *Coatings* 2021, 11, 75. <https://doi.org/10.3390/coatings11010075>
3. Grant, G.T.; Morris, E.R.; Rees, D.A.; Smith, P.J.C.; Thom, D. Biological interactions between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. *FEBS Lett.* 1973, 32, 195–198
4. Persia, F.; Alisi, C.; Bacchetta, L.; Bojorquez, E.; Colantonio, C.; Falconieri, M.; Insaurralde, M.; Meza Orozco, A.; Sprocati, A.R.; Tati, A. Nopal as organic additive for bio-compatible and eco-sustainable lime mortars. *Proceedings VII International Conference "Diagnosis, Conservation and Valorization of Cultural Heritage, 2016, 245-251, ISBN: 978-88-942118-0-1*
5. Schiattone, S. e Iacopino, N. Tesi di Laurea dal titolo "Il restauro del portale lapideo della Chiesa di San Giovanni Battista: Le biotecnologie per la conservazione" Istituto Centrale per il Restauro. AA 2019-2020
6. P. Prudentino, C. Alisi, G. Pasquariello, L. Bacchetta, A.R. Sprocati, A. Meza-Orozco, F. Persia (2018) Application of a natural plant product as consolidant for paper heritage. In: *Cultural Heritage Conservation Science, 6th International Conference: YOCOCU, Youth in Conservation of Cultural Heritage, Matera (Italy), May 22-26 2018.*

# Tavole vibranti e protezione antisismica di edifici e monumenti storici

Le prove su tavola vibrante costituiscono la tecnica più affidabile di sperimentazione in laboratorio nel campo dello studio delle vibrazioni. Presso la hall sismica del Centro di Ricerche ENEA della Casaccia (Roma) è collocato un impianto di tavole vibranti tra le più grandi d'Europa e all'avanguardia nella strumentazione e nelle tecniche di analisi dei dati di vibrazione acquisiti nelle prove sismiche, con notevoli applicazioni in recenti progetti sulla protezione e la conservazione dei beni culturali.

DOI 10.12910/EAI2022-023

di Ivan Roselli, Vincenzo Fioriti, Antonino Cataldo, Massimiliano Baldini, Alessandro Colucci, Alessandro Picca, Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la Prevenzione del rischio sismico e idrogeologico - ENEA

**L**e prove su tavola vibrante costituiscono la tecnica più affidabile di sperimentazione in laboratorio nel campo dello studio delle vibrazioni. Infatti, si tratta dell'unica tecnica in grado di riprodurre realisticamente l'eccitazione vibrazionale di origine naturale (come quella generata dai terremoti) o di origine antropica (come quella generata da vibrazioni industriali o nei mezzi di trasporti). Data la notevole difficoltà di eseguire queste sperimentazioni con forte scalatura degli oggetti studiati, le tavole vibranti di grandi dimensioni sono particolarmente preziose. Inoltre, di particolare pregio sono le tavole vibranti a 6 gradi di libertà (GDL), ovvero capaci di riprodurre una vibrazione in qualsiasi direzione e qualsiasi rotazione nello spazio.

Nella seconda metà degli anni '80 dello scorso secolo fu realizzato presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia una hall sismica dotata di 2 tavole vibranti a 6 GDL tra le più grandi d'Europa, ancora oggi all'avanguardia per dimensioni e prestazioni. All'epoca

era finalizzata alla verifica sismica di grandi componenti per centrali nucleari che dovevano soddisfare i rigorosissimi e onerosi requisiti prescritti dalle norme a livello internazionale in questo settore di cui l'ENEA era il riferimento nazionale. Successivamente, l'attività principale di questi impianti è stata rivolta ai settori dell'ingegneria industriale e civile con particolare riferimento allo studio di tecniche innovative per la protezione di oggetti e strutture dagli effetti dannosi delle vibrazioni. In effetti, oggi si può definire come il laboratorio che in ENEA si occupa dello studio sperimentale delle vibrazioni in generale, ed è molto attivo sia nella caratterizzazione del comportamento degli oggetti sottoposti a sollecitazione vibrazionale sia nello studio di tecniche di protezione dai danni che le vibrazioni possono indurvi.

**Innovazione continua di strumentazioni e tecniche di analisi**

**Nel corso degli ultimi anni, inoltre, questi impianti sperimentali sono**

**stati arricchiti e innovati con l'acquisizione e lo sviluppo di nuove strumentazioni di misura e di nuove tecniche di analisi delle vibrazioni che rendono le capacità di sperimentazione di questo laboratorio una eccellenza che si rinnova continuamente ai livelli più alti.** In particolare, nel 2007 è stato il primo laboratorio di ingegneria sismica al mondo ad essersi dotato di un sistema di motion capture 3D passivo dedicato a prove su tavola vibrante (**sistema 3DVision**).

Questo tipo di sistemi sono poi stati successivamente adottati anche in altri importanti laboratori di questo genere in Italia e all'estero. In breve, questo sistema è in grado di eseguire la misura dello spostamento nello spazio 3D di centinaia di punti dell'oggetto sottoposto ai test sismici con una accuratezza inferiore al decimo di mm e con una frequenza di campionamento fino a 2000 Hz [1]. Oltre a rappresentare un'applicazione all'avanguardia nella misura degli spostamenti, tale sistema è utilizzato in modo perfettamente integrato





con il laboratorio virtuale DYSCO (structural DYNamic, numerical Simulation qualification tests and vibration Control), che consente la condivisione interattiva in tempo reale con utenti remoti della sperimentazione in corso, e può quindi dare un contributo alla disseminazione dei risultati della ricerca scientifica sia a livello di formazione (per studenti e professionisti del settore) che di partecipazione attiva da parte di partner di ricerca collocati fisicamente ovunque nel mondo [2].

Grazie all'aggiornamento del 2016 nell'ambito del progetto COBRA (Conservazione dei Beni culturali, basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti) e all'estensione e al rinnovamento continuo dei suoi componenti, il sistema 3DVision rimane a tutt'oggi il più avanzato nel suo genere in Italia.

Dal 2017, inoltre, è stata introdotta nello studio dei test di vibrazione anche una nuova tecnica di elaborazione avanzata derivata dal metodo del moto magnificato, in grado di fornire indicazioni sulla risposta di un ogget-

to sottoposto a vibrazione dall'analisi di semplici filmati [3], il che rappresenta l'ultima frontiera dello studio delle vibrazioni tramite strumenti di visione digitale.

A testimonianza del continuo impegno di ENEA ad aggiornare e rinnovare la hall sismica, è in corso un adeguamento delle attrezzature e delle apparecchiature del laboratorio per il suo inserimento nella piattaforma FIXLAB del nodo italiano (E-RIHS.it) della rete europea E-RIHS (European Research Infrastructure for Heritage Science), la rete di laboratori in grado di offrire accesso a strumenti scientifici e conoscenze all'avanguardia nel settore dei Beni Culturali. Tutte queste potenzialità ed eccellenze sono state applicate di recente con successo in diversi progetti sulla protezione e la conservazione del patrimonio storico-artistico.

### Il progetto RestArt

Un'esperienza appena conclusa è stata quella del progetto RestArt finanziato su bando POR FESR 2014-2020, con

risultati di grande successo. Il progetto mirava a sviluppare una tecnologia innovativa per il restauro di statue ed elementi architettonici lapidei di grandi dimensioni; in particolare, si tratta di un metodo innovativo per la ricomposizione di grandi frammenti lapidei tramite un sistema meccatronico di alta precisione<sup>1</sup>. Al fine di verificare l'efficacia dell'innovativo metodo di imperniaggio di precisione sono state svolte presso il Centro di ricerca ENEA Casaccia una serie di prove su tavola vibrante [5] (figura 1). Nello specifico, sono stati realizzati dei provini costituiti da pilastri in marmo e in travertino che sono stati rotti a metà in modo da simulare dei frammenti lapidei di opere antiche. I provini sono poi stati ricomposti (con il metodo innovativo sviluppato nel progetto, e, per confronto, con la tecnica di imperniaggio tradizionale) e sottoposti a sollecitazioni a intensità estremamente elevata, riproducendo la vibrazione generata da terremoti estremi o da trasporti ad alta velocità su strada fortemente sconnessa.

**Le prove su tavola vibrante hanno**



Fig. 1 Allestimento di prova su tavola vibrante per il confronto della resistenza a vibrazione sismica di un provino in marmo ricomposto con tecnica tradizionale (sinistra) e uno ricomposto con sistema RestArt (destra)

dimostrato la grande efficacia del nuovo metodo. I provini così ricomposti, infatti, hanno evidenziato una resistenza molto maggiore alle sollecitazioni meccaniche rispetto a quelli ricomposti con la tecnica tradizionale, oltre ad avere il vantaggio di consentire ai restauratori una movimentazione e una gestione dei grandi frammenti più agevole, veloce e sicura. Inoltre, la maggiore precisione nella lavorazione dei frammenti consente una minore invasività dell'intervento e un maggiore rispetto del materiale antico. In questo modo l'ENEA ha contribuito a validare una innovazione tutta italiana nel settore, permettendo alla società privata Ma.Co.Rè. capofila del progetto RestArt, di eseguire già nei mesi scorsi diversi interventi di restauro, tra cui la notevole ricomposizione della statua di Diana Cacciatrice in marmo Thassos presso il Museo Pio Capponi di Terracina. Questa statua era conservata nei depositi del museo in quattro grandi frammenti (torso, braccio destro, testa e base con gamba destra) che sono stati rassembrati con

grade efficacia, consentendo al museo di rimettere la statua nella sua naturale posizione verticale e collocarla in esposizione.

### Basamenti antisismici per statue

Un'altra linea di ricerca che ha avuto molto risalto è stata quella sulla validazione sperimentale di sistemi di isolamento di statue e oggetti museali. Questa linea ha condotto i ricercatori ENEA a progettare e validare negli scorsi anni i basamenti antisismici per i Bronzi di Riace, su cui oggi le due famose statue sono esposte presso il Museo Archeologico Nazionale di Reggio Calabria, nonché per varie altre importanti statue del Duomo di Orvieto e del prospiciente museo [6]. Su questa linea si è avviato da alcuni mesi un nuovo progetto dall'acronimo evocativo, MONALISA (MONitoraggio Attivo e Isolamento da vibrazioni e Sismi di oggetti d'Arte), nell'ambito del Distretto Tecnologico Culturale (DTC) Lazio, dedicato allo sviluppo sperimentale della tecnica dell'isolamento sismico per

l'applicazione agli oggetti d'arte, con estensione alla protezione dalle vibrazioni in genere, incluse quelle da traffico su strada e rotaia, un aspetto molto rilevante nei centri storici delle città d'arte. Il progetto, coordinato dall'Università La Sapienza di Roma e con i partner Università degli Studi Roma Tre e Somma s.r.l. prevede la sperimentazione su tavola vibrante sotto forzante sismica di un sistema di isolamento per il "Sarcofago degli Sposi" del Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma.

Molto importante è anche la linea di ricerca che studia le nuove tecniche di rinforzo antisismico delle murature storiche. Questo tema è molto rilevante, in particolare nel nostro Paese, in quanto buona parte del patrimonio costruito esistente nelle zone a media e alta sismicità è rappresentato da questa tipologia di costruzioni, le quali sono spesso caratterizzate da scarsa qualità ed elevata vulnerabilità sismica (figura 2), e di cui le conseguenze provocate nella sequenza sismica dell'Italia centrale 2016-2017 che ha colpito Amatrice sono solo l'ultimo tragico esempio [7].

Il gruppo di ricerca delle tavole vibranti dell'ENEA ha ormai una lunga tradizione ed esperienza su questo



Fig. 2 Collasso durante prova su tavola vibrante di un pannello in muratura storica tipica della zona epicentrale della sequenza sismica dell'Italia centrale 2016-2017- paramento esterno.

tema, avendo testato svariate tecniche di rinforzo per la muratura storica nel corso degli anni alcune delle quali sono state brevettate e commercializzate proprio a valle di queste sperimentazioni. Tra i sistemi di rinforzo sperimentati, ad esempio, i sistemi CAM e DIS-CAM dell'azienda EDIL CAM Sistemi S.r.l. testato nel progetto TREMA negli anni 2003-2007 [8].

### Il progetto RIPARA

Proprio la EDIL CAM Sistemi S.r.l. è il partner aziendale dell'ultimo progetto appena iniziato nell'ambito del DTC Lazio su questo filone di ricerca, denominato RIPARA (Sistemi integrati di miglioramento sismico del patrimonio architettonico), coordinato dall'Università degli Studi Roma

Tre e con la partecipazione anche delle Università La Sapienza di Roma e di Cassino e Lazio Meridionale. Obiettivo è quello di mettere a punto una evoluzione del sistema CAM che sia meno invasivo dal punto di vista estetico per consentire l'applicazione alla muratura storica faccia vista, così da mantenere il suo aspetto esterno tradizionale pur incrementando considerevolmente la resistenza sismica complessiva della struttura. Più nel dettaglio, si esplorerà un sistema di rinforzo basato su micro-trefoli o bande sottili di acciaio inox, che garantiscano la connessione tra i paramenti murari, impedendone la disgregazione, ma nascosti nei giunti di malta e nella sezione del muro (connettori passanti) per minimizzarne l'impatto visivo. I materiali e le solu-

zioni tecniche previste assicurano durabilità e reversibilità degli interventi. Sarà anche impiegato un sistema integrato di monitoraggio con fibre ottiche che permetterà una manutenzione tempestiva e mirata.

A questo scopo, nei prossimi mesi sarà costruita, in una apposita area di cantiere allestita all'interno della hall sismica, una casetta in muratura storica. La casetta sarà testata su tavola vibrante, sia con il rinforzo innovativo che senza rinforzo. L'analisi del confronto dei risultati ottenute dalle due configurazioni porterà ad una valutazione dell'efficacia della nuova soluzione antisismica.

*Per info: [ivan.roselli@enea.it](mailto:ivan.roselli@enea.it)*

#### BIBLIOGRAFIA

1. G. De Canio, G. de Felice, S. De Santis, A. Giocoli, M. Mongelli, F. Paolacci, I. Roselli, (2016) "Passive 3D motion optical data in shaking table tests of a SRG-reinforced masonry wall", *Earthquakes and Structures*, 40(1), pp. 53-71, ISSN: 2092-7614, DOI: 10.12989/eas.2016.10.1.053.
2. G. De Canio, M. Mongelli, I. Roselli, (2013) "3D Motion capture application to seismic tests at ENEA Casaccia Research Center: 3DVision system and DySCo virtual lab", *WIT Transactions on The Built Environment*, 134, pp. 803-814, ISSN: 1743-3509, DOI: 10.2495/SAFE130711.
3. V. Fioriti, I. Roselli, A. Tati, G. De Canio, (2017) "Applicazione della vibrometria visuale alla sperimentazione sismica su tavola vibrante", *Proc. of 17th Conferenza Nazionale della Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica*, Milano, ottobre 25-27.
4. P. Nardelli (2021) "Apparato per la rilevazione, misurazione e movimentazione per ricomposizioni di oggetti fratturati e relative a tecnica di utilizzo dello stesso", *Brevetto Italiano applicazione n. 102021000001973*, data 1 Febbraio 2021.
5. P. Nardelli, M. Pavan, G. Pompa, S. Borghini, M. Baldini, A. Colucci, V. Fioriti, A. Picca, A. Tati, I. Roselli (2021) "Sistema RestArt per la ricomposizione ad alta precisione di opere d'arte lapidee frammentarie", *Archeomatica*, 13(2), pp. 10-13, ISSN: 2037-2485.
6. De Canio, G. (2015) "New anti seismic basements for high vulnerable statues in Italy", *Proc. of 4th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, San Diego, Ca, USA, settembre 9-11.
7. G. de Felice, D. Liberatore, S. De Santis, F. Gobbin, I. Roselli, M. Sangirardi, O. Al Shawa, L. Sorrentino, (2022) "Seismic behaviour of rubble masonry: shake table test and numerical modelling", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 1-22 (on-line), ISSN: 1096-9845, DOI: 10.1002/eqe.3613.
8. M. Dolce, F.C. Ponzo, C. Moroni, D. Nigro, A. Goretti, F. Giordano, G. De Canio, R. Marnetto. (2006) "3D dynamic tests on 2/3 scale masonry buildings retrofitted with different systems", *Proc. of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ginevra, Svizzera, settembre 3-8, ISBN: 9781615676750.

1. Messo a punto ed ideato dall'Arch. P. M. Nardelli [4] per Ma.Co.Rè. s.r.l., partner capofila del progetto RestArt,

# Analisi di antichi tappeti cinesi di seta e metallo

I ricercatori ENEA hanno indagato i materiali costitutivi e la manifattura dei fili metallici utilizzati nei *Palace carpets*, ovvero antichi tappeti cinesi, di manifattura imperiale. In particolare, sono state applicate tecniche di Fluorescenza X e di Microscopia ottica ed elettronica a scansione che hanno permesso di evidenziare le caratteristiche peculiari di questi manufatti destinati alla Città proibita e alle committenze più ricche ed esclusive.

DOI 10.12910/EAI2022-024

di Daniele Mirabile Gattia, Pietro Moioli, Claudio Seccaroni, *Laboratorio Materiali e processi chimico-fisici - ENEA*

**T**ra i tappeti di produzione cinese spiccano per ricchezza di manifattura e materiali impiegati i *Palace carpets*, così definiti con riferimento alla loro destinazione per il Palazzo imperiale. Ovviamente, questa tipologia di manufatti, sebbene non riservata alla sola Città Proibita, rappresentava un prodotto destinato alle committenze più ricche ed esclusive della società cinese. Dal punto di vista dei materiali, sono contraddistinti dalla presenza di sfondi o decorazioni di aspetto dorato (fig. 1), realizzate con fili metallici ancorati all'ordito del tappeto con la tecnica di tessitura Soumak (fig. 2). Il presente contributo è dedicato allo studio dei materiali e della manifattura dei fili metallici utilizzati nei *Palace carpets*, argomento che, a nostra conoscenza, non è mai stato oggetto di una ricerca specifica. La possibilità di studiare i fili metallici di circa sessanta tappeti appartenenti al Museo Schneiberg a Torino e ad alcune collezioni private, la cui esecuzione si dispiega in maniera abbastanza omogenea lungo l'intero periodo

della dinastia Qing (1644-1911), ha consentito di definire un quadro abbastanza accurato, il che risulta ancor più significativo in quanto, sebbene si abbiano vaghe notizie, per le epoche precedenti non sono a tutt'oggi noti tappeti cinesi con fili metallici.

Dopo una preliminare ricognizione tramite microscopio digitale, che ha consentito di selezionare le superfici dei tappeti da indagare, sono state effettuate misure XRF, finalizzate a una valutazione semiquantitativa degli elementi presenti nei fili metallici. Sulla base di questa valutazione sono stati effettuati alcuni prelievi, analizzati, per una completa caratterizzazione della parte metallica del filo, mediante microscopia ottica e microscopia elettronica a scansione (SEM).

## Strutture complesse

**Dal punto di vista dei materiali costitutivi e del loro assemblaggio i fili metallici appartenenti ai tappeti presentano caratteristiche peculiari, ben distinte da quelle riscontrabili su tessuti e ricami cinesi**

**precedenti o coevi, che generalmente risultano omogenei con quanto**



Fig. 1 Tappeto in seta e fili in rame dorato con Fenice imperiale, manifattura imperiale di Pechino, Cina, Dinastia Qing (1644-1911), 190x287 cm. Iscrizione: Kunning gong yuyong (Ad uso imperiale per il Palazzo della Tranquillità Terrestre). Torino, Museo Schneiberg (K121).

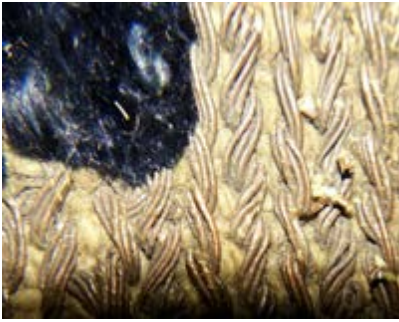


Fig. 2 Fotografia a basso ingrandimento di un particolare del tappeto K152, che mostra la tessitura Soumak con cui sono stati inseriti i fili metallici.

riscontrato anche in altre regioni estremorientali. Ancora oggi in Cina e Giappone, come fili metallici nei tessuti sono utilizzate sottilissime striscioline ritagliate da fogli di carta, pergamena o minugia su cui è stata battuta una foglia metallica



Fig. 3 Particolare dei fili metallici nel tappeto K142. Microscopio ottico.

(ad es. di oro o argento). Nei tappeti, invece, i fili hanno una **struttura più complessa**, con un nucleo centrale costituito da fibre, in genere di seta, rivestito, in maniera regolare, da un avvolgimento metallico nastriforme a spirale (fig. 3).

Come è possibile riscontrare dalle striature che corrono parallele ai bordi della lamina metallica (fig. 4), tutti i filati metallici presenti nei tappeti indagati appartengono alla tipologia CDR (*cast, drawn and rolled*; fuso, trafilato e laminato).

Altra caratteristica ricorrente in modo sistematico è rappresentata dal fatto che tutti i fili studiati sono

costituiti da rame o da leghe rame-zinco (ottone), ad elevato contenuto di rame<sup>1</sup>. Il ricorso al rame come componente principale delle striscioline metalliche di avvolgimento garantiva maggior solidità e durabilità meccanica ai manufatti, che, trattandosi di tappeti, dovevano essere calpestati con la conseguente usura e schiacciamento delle guaine che si avvolgono sul nucleo centrale dei fili; meno plausibile, vista la destinazione di questi tappeti, sembrerebbe invece una scelta del metallo dettata dalla riduzione dei costi.

#### Lamine di rame rivestite di ottone, argento o oro

La larghezza dei nastri metallici delle lamine di avvolgimento è risultata in genere contenuta tra 350 e 650 micron; lo spessore totale (comprensivo di eventuali rivestimenti), misurabile solo sui prelievi indagati al SEM, è risultato in genere compreso tra 15 e 20 micron.

Dal punto di vista strutturale, le lamine di avvolgimento sono classificabili in tre gruppi, in funzione della presenza o meno e della composizione di rivestimenti superficiali. Il caso più semplice (a) è rappresentato da una lamina priva di rivestimenti; una situazione più articolata (b) è rappresentata da una lamina con rivestimento analogo sulle due facce; ancora più complesso è il caso in cui i rivestimenti

sulle due facce si differenziano per composizione e/o struttura (c).

Alla classe (a), con lamina costituita da rame pressoché puro, appartengono i tappeti K120<sup>2</sup>, K145 e K157, mentre sul tappeto K102, dei quattro punti indagati, tre hanno mostrato la sola presenza di rame e uno di rame e argento, e ciò sembrerebbe frutto di scelte intenzionali nella rappresentazione di alcuni dettagli delle figure.<sup>3</sup>

All'analisi XRF un elevato numero di tappeti ha mostrato la presenza congiunta di rame e zinco. I soli dati XRF non consentono tuttavia di stabilire se rame e zinco siano in lega, riconducendo il manufatto alla classe (a), oppure se lo zinco appartenga al rivestimento della lamina, riconducendo il manufatto alla classe (b). Le indagini al SEM hanno mostrato entrambe le possibilità, avendo riscontrato nei campioni prelevati dai tappeti K132 e K142 una lamina di rame con rivestimento in rame/zinco (ottone)<sup>4</sup>, e nel campione prelevato dal tappeto K156 una lamina in rame/zinco (con basso tenore di zinco) priva di rivestimento.

Alla classe (c) appartiene il campione prelevato dal tappeto K121, con lamina in rame rivestita con argento sul lato interno dell'avvolgimento, a contatto col nucleo di fibre, e con oro e argento (in lega o sovrapposti) sul lato esterno. Le misure XRF hanno inoltre evidenziato la presenza congiunta di oro e argento insieme a rame sui tappeti K123, K152 e K160,

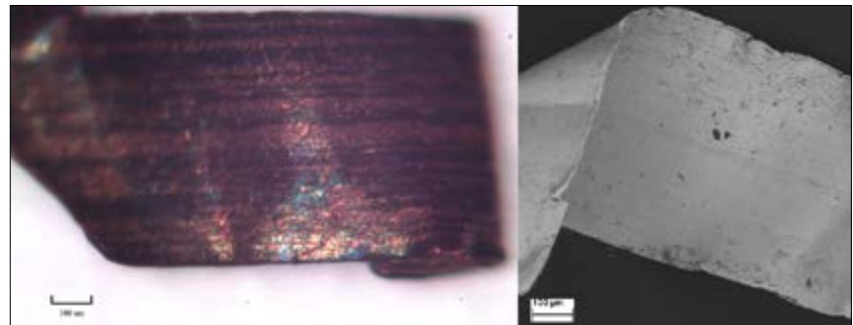


Fig. 4 Particolare con i segni della trafilatura sulle lamine di avvolgimento nei fili del tappeto K156. Microscopio ottico/SEM.

dai quali non sono stati prelevati campioni da esaminare al SEM.

### Tecnologie e strumenti

Per le indagini sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

- **Fluorescenza X:** Sistema ELIO della XGLab, con generatore di raggi X con anodo di Rh, rivelatore al Si con risoluzione 135 eV a 5,9 keV, distanza campione-rivelatore 1,4 cm, diametro di collimazione del fascio X incidente 0,1 cm. Tensione

e corrente di alimentazione pari a 40 kV e 20  $\mu$ A: tempo di misura 90 secondi.

- **Microscopia ottica:** Dino-lite Digital Microscope (in situ); Stereo-microscopio SZX12 Olympus con acquisizione digitale dell'immagine (in laboratorio).
- **Microscopia elettronica:** Microscopio Elettronico a Scansione Zeiss EVO MA15. Le immagini sono state acquisite sia con rivelatori di elettroni secondari che retro-diffusi, ottenendo immagini in toni

di grigio associabili alla morfologia e alla chimica del campione. Per le osservazioni è stata utilizzata una tensione di accelerazione di 20 kV; i campioni sono stati disposti su portacampioni in alluminio rivestiti con carbon-tape; per l'osservazione in sezione alcuni frammenti sono stati inglobati a freddo in resina epossidica.

*Per info: [daniele.mirabile@enea.it](mailto:daniele.mirabile@enea.it)*

### BIBLIOGRAFIA

1. J.A. Darrah, Metal Threads and Filaments, in Recent Advances in the Conservation and Analysis of Artefacts. Jubilee Conservation Conference, Londra, 6-10 luglio 1987, pp. 211-222.
2. M. Guglielminotti Trivel, L. Paderni, F. Comisi, Il Drago e il Fiore d'Oro. Potere e magia nei tappeti della Cina Imperiale (1644-1911), catalogo della mostra (Torino, Museo d'Arte Orientale, 5 dicembre 2015-28 marzo 2016), Torino 2015.
3. J.F. Haskins, Imperial Carpets from Peking, catalogo della mostra (15 febbraio-18 marzo 1973), University of Pittsburgh 1973.
4. M. Járó, Metal Thread Variations and Materials: Simple Methods of Pre-treatment Identification for Historical Textiles, in I. Éri, D. Eastop, C. Rockwell (Eds.), Conserving Textiles: Studies in Honour of Ágnes Timár-Balázs, ICCROM Conservation Studies 7, Roma 2009, pp. 68-75.
5. A. Karatzani, Metal Threads: The Historical Development, in I. Tzachili, & E. Zimi (Eds.), Textiles and Dress in Greece and the Roman East: A Technological and Social Approach, Atene 2012, pp. 55-64.
6. H.A. Lorentz, Chinesische Teppiche. Geschichte, Ästhetik, Symbolik, München 1975.
7. L. Paderni, E. Danon, R. Cossa, The Flower of Buddha. Silk and Metal Carpets from The Forbidden City, Roma 2006.
8. M.A. Polichetti, Dragons. Imperial Court Carpets from the Qing Dynasty, Roma 2009.
9. A. Schlombs, Glanz der Himmelsöhne. Kaiserliche Teppiche aus China 1400-1750, catalogo della mostra tenuta presso il Museum für Ostasiatische Kunst Köln (15 ottobre 2005-15 gennaio 2006), London 2005.

1. Le misure XRF hanno evidenziato la presenza di zinco su 51 dei 59 tappeti indagati. In ambito occidentale l'uso di filati metallici costituiti da strisciole di rame (o una sua lega) avvolte attorno a un nucleo di fibre di varia natura è stato impiegato a partire dal XV secolo, ed era finalizzato a prodotti più economici.
2. I codici identificativi dei tappeti sono quelli assegnati in fase di catalogazione da parte degli esperti del Museo Schneiberg.
3. Il punto contenente argento è localizzato su un artiglio di uno dei draghi, mentre gli altri privi di argento sono tutti localizzati sugli occhi.
4. Il rivestimento dei campioni provenienti da entrambi questi tappeti presenta un aspetto poroso e appare spesso fortemente degradato e delaminato.

# Il sistema integrato museum remote control

La divisione ICT dell'ENEA, insieme con Syremont e la Società Promente, ha progettato e sviluppato un innovativo sistema di monitoraggio da remoto delle tecnologie multimediali facenti parte dell'allestimento museale e delle condizioni microclimatiche entro cui sono esposti e utilizzati. L'obiettivo è di garantire la corretta funzionalità delle attrezzature, l'aggiornamento dei sistemi operativi, delle applicazioni e dei contenuti culturali, il controllo di eventuali anomalie.

DOI 10.12910/EAI2022-025

di Marialuisa Mongelli<sup>1</sup>, Marco Puccini<sup>1</sup>, Beatrice Calosso<sup>1</sup>, Antonio Perozziello<sup>1</sup>, Samuele Pierattini<sup>1</sup>, Fabio Simoni<sup>1</sup>, Silvio Migliori<sup>1</sup>, *Divisione per lo Sviluppo di Sistemi per l'Informatica e ICT (ICT) - ENEA, Elena Giangiulio, Syremont Monument Management s.p.a, Luca Ferrari<sup>3</sup>, Promente TLC s.r.l.*

**Il progetto integrato Ikaros, cofinanziato dall'Unione Europea, nell'ambito del POR FESR LAZIO 2014-2020 – Sostegno al riposizionamento competitivo di sistemi e filiere produttive<sup>1</sup> vede la collaborazione tra Syremont S.p.a, nel ruolo di capo progetto, la divisione ICT dell'ENEA, la Nomos Ricerche s.r.l e la Promente TLC, che ha curato lo sviluppo del sistema di monitoraggio (Sistema integrato – Museum Remote Control). Ikaros si compone di due programmi di investimento focalizzati su due diversi ambiti:**

- **un programma di investimento in attività di Ricerca Industriale e di Sviluppo Sperimentale** finalizzati allo studio, alla progettazione e alla realizzazione dei contenuti culturali, tecnologici e multimediali che costituiranno il Museo dedicato al volo - Cantiere Sperimentale Elettronico Aeronautico nella località di Anguillara Sabazia (RM).
- **un programma di efficientamento energetico** finalizzato alla riqualifica-

zione della infrastruttura all'interno del quale sarà ospitato il Cantiere Sperimentale Elettronico Aeronautico.

Il Museo del Volo Ikaros "Sogno volante, Cantiere Sperimentale Elettronico Aeronautico Experimental Electronic Aeronautic Yard" sarà ospitato all'interno di un complesso immobiliare di proprietà dell'antica famiglia romana dei Torlonia, il cui perimetro è tracciato sulle carte geografiche sin dal 1500. Il complesso, già sottoposto a ristrutturazione alla fine degli anni '80 con destinazione esclusiva ad albergo, è oggi destinatario di un importante intervento di riqualificazione finalizzato al recupero della originaria funzione agricola e alla sua integrazione con attività di carattere culturali e turistiche oltre che produttive.

La vicinanza con lo storico Museo dell'Aeronautica Militare di Vigna di Valle ha ispirato la progettazione del Museo del Volo come luogo dedicato alla più fantastica ambizione dell'uomo, quella di volare ispirandosi alla natura, all'irraggiungibile potenza del volo ad

ali battenti, agli studi e sperimentazioni di ieri e di oggi: natura, mitologia, storia, fisica, sono le chiavi di lettura per comprendere come l'uomo sin dall'antichità abbia cercato di violare, vivere e dominare il cielo. Il progetto include una revisione completa degli impianti con particolare riferimento al raffrescamento e riscaldamento che ha condotto a identificate soluzioni tecnologiche idroniche a basso consumo e alto rendimento.

## L'attività ENEA

L'attività di ENEA si inserisce nella progettazione e realizzazione di un sistema innovativo, scalabile e trasferibile presso altre realtà museali per il monitoraggio e controllo remoto degli ambienti e delle installazioni cosiddette "exhibit hands on": tecnologie che invitano all'interazione rendendo il pubblico partecipe e attivo.

E' infatti sempre più diffuso anche in ambito museale l'impiego di tecnologie di monitoraggio e sensoristica [1] [2] [3] [4] che necessitano di sistemi



di controllo. Requisito fondamentale è quindi garantire attraverso un sistema di monitoraggio remoto, le funzioni software e meccaniche delle tecnologie adottate.

In sostanza, uno strumento informatico a disposizione del gestore del museo, che consente in remoto, via web, di monitorare ed intervenire sulle installazioni digitali (“exhibit”) presenti all’interno dei locali dello stesso, fornendo anche informazioni utili relativamente allo stato di salute dei sistemi informatici ed elettronici del complesso (server, sistemi operativi, illuminazione, diffusori acustici, schermi, sistemi di condizionamento, ...). Gli exhibit sono sostanzialmente diverse tipologie di installazioni interattive per mezzo delle quali l’utente (il visitatore), fruisce di contenuti digitali informativi. Tali sistemi hanno una complessità intrinseca rappresentata sia dai supporti hardware (computer, tablet, touchscreen, rilevatori di prossimità, alimentatori, dischi di archiviazione, ...) che software (sistemi ope-

rativi, software di visualizzazione, ...) che possono incorrere in criticità tali da comprometterne il corretto funzionamento: dall’eccessiva temperatura di un processore, all’esaurimento dello spazio di archiviazione o delle batterie, alla necessità di aggiornamento di un dato firmware, software o componente del sistema operativo che lo ospita.

A questo si aggiungono ulteriori fattori, a monte, quali l’alimentazione e/o l’illuminazione delle sale, il funzionamento dei sistemi gestionali o dei sistemi per consentire la connettività. Conoscere per tempo eventuali malfunzionamenti o, semplicemente, la necessità di intervenire con manutenzioni, aggiornamenti e sostituzioni, rappresenta un notevole vantaggio nella gestione della struttura e delle attività che vi vengono svolte, permettendo di mantenere alta la qualità dell’esperienza di fruizione. Vi sono, tra questi interventi, alcuni che possono svolgersi anche da remoto, senza la necessità di far intervenire in loco una squadra di tecnici, come ad esempio

l’aggiornamento di un sistema operativo o il caricamento di nuovi contenuti multimediali.

Il sistema progettato e sviluppato da ENEA e commissionato alla Società Promente TLC s.r.l., è in grado di svolgere questi compiti grazie ad un’architettura software a basso impatto, scalabile (vi si possono agganciare dispositivi e sensori pressoché di ogni genere ed in numero variabile), trasportabile (il sistema può essere ospitato direttamente su server del museo o su sistemi on cloud agganciati alla rete del museo) e replicabile (lo stesso sistema può essere customizzato per adattarsi a diverse tipologie di esigenze, musei, gallerie e/o installazioni).

### Risultati e conclusioni

Dopo le attività di progettazione ed implementazione delle soluzioni tecnologiche scelte, è stato approntato, presso l’edificio F20 del Centro Ricerche ENEA Casaccia, un primo dimostratore nella sala CED del Centro Ricer-



che Casaccia di ENEA (Figura 1). Nel corso della dimostrazione live, a cura della Società Promente TLC, sono state illustrate le funzionalità del sistema il quale, mediante una semplice ed intuitiva dashboard (Figura 1), permette di monitorare ed intervenire sulle diverse tipologie di dispositivi collegati. Il siste-

ma, pronto per essere trasferito presso il sito museale, sarà trasferito e collaudato non appena possibile

**In conclusione, quindi, il Sistema Integrato Museum Remote Control è un prodotto innovativo e scalabile, utilizzabile in tutti quei contesti museali, e più in generale espositivi,**

**dotati di tecnologie sottoposte a utilizzo intensivo da parte del pubblico di cui occorre garantire la continuità e stabilità delle applicazioni e del software, nonché manutenzioni programmate e mirate.**

*Per info: [marialuisa.mongelli@enea.it](mailto:marialuisa.mongelli@enea.it)*

#### BIBLIOGRAFIA

1. F. D'Amato, P. Gamba, E. Goldoni, Monitoring heritage buildings and artworks with Wireless Sensor Networks, in: 2012 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, EESMS 2012 – Proceedings, 2012, pp. 1–6
2. A. Mecocci, A. Abrardo Monitoring architectural heritage by wireless sensors networks: San Gimignano—a case study Sensors (Basel), 14 (2014), pp. 770-778, 10.3390/s140100770
3. M. Bacci, C. Cucci, A.A. Mencaglia, A.G. Mignani Innovative sensors for environmental monitoring in museums Sensors (Switzerland), 8 (2008), pp. 1984-2005, 10.3390/s8031984
4. L.M.R. Peralta, L.M. Pestana, L. de Brito

1. Avviso Pubblico n. 7 “Beni Culturali e Turismo” approvato con Determinazione n. G16395 del 28 novembre 2017 dalla Regione Lazio,

# Tecnologie robotiche per i beni culturali

L'ENEA è uno degli otto fondatori del Centro di Eccellenza (CdE) del Distretto Tecnologico per i Beni Culturali del Lazio, nato quale punto di aggregazione e integrazione di competenze tecnologiche applicabili alla conservazione, valorizzazione e promozione del patrimonio storico-artistico e culturale. In tale ottica sono stati banditi dei progetti di ricerca su fondi FESR; tra i vincitori vi è "LAke Heritage Knowledge and Exploration" (LAHKE), coordinato da Enea e incentrato sull'applicazione di tecnologie avanzate ad un villaggio neolitico sepolto nel lago di Bracciano.

DOI 10.12910/EAI2022-026

di Ramiro dell'Erba, Giacomo Cupertino, Luciano Blasi, *Laboratorio di Robotica e Intelligenza Artificiale - ENEA*

**U**no dei settori emergenti dell'economia italiana è la valorizzazione dell'immenso patrimonio culturale posseduto dal nostro Paese attraverso nuove modalità di fruizione, conservazione e ricerca. ENEA supporta con svariate attività lo sviluppo di tecnologie applicabili ai beni culturali, a volte riutilizzabili in altri campi. **Il laboratorio di Robotica e Intelligenza Artificiale dell'Agenzia è coordinatore della rete R4 dei laboratori del DTC "Internet-of-things, robotica, intelligenza artificiale applicata alla cura e valorizzazione dei Beni Culturali", ed è impegnato da molti anni in progetti di robotica per i beni culturali che hanno ricadute anche in altri settori tecnologici [1].**

Ne sono l'esempio il passato **progetto Harness** incentrato sulla robotica subacquea che può trovare applicazioni non soltanto nella ricerca e monitoraggio ambientale, ma anche nella security e nel ritrovamento di reperti archeologici sottomarini [2] e il **progetto LAHKE** che si propone di trasferire tecnologie avanzate

alla ricerca archeologica in acque interne e marine, per mezzo di strumenti di indagine basati su **sensori trasportati da mezzi robotizzati**. Ciò avverrà tramite l'addestramento di giovani (70% del budget di 200mila euro), la diffusione dei risultati e del metodo di ricerca (10% del budget) e con la partecipazione di ditte operanti nel settore affinché beneficino del trasferimento tecnologico da parte degli enti di ricerca.

## Un sito archeologico di grande valore storico

Il progetto ha una durata di 18 mesi (ma è stata richiesta una proroga, a seguito dei ritardi causati dal Covid) e consentirà anche di sviluppare **documentazione di tipo multimediale** riguardante il sito archeologico della Marmotta sepolto nel lago di Bracciano, **di grande valore storico** ed estremamente ricco di reperti e conoscenze sulle popolazioni locali e solo parzialmente esplorato, grazie a progetti proposti e curati dal Museo delle Civiltà (partner del

progetto), negli ultimi diciotto anni. Durante questo periodo, con il supporto di sub, sono stati portati alla luce **manufatti e testimonianze di insediamenti neolitici di circa 8000 anni fa [3]** che hanno consentito di ricostruire una parte importante della storia di quel periodo, non limitata alla località, ma con evidenti indicazioni di connessioni con molte altre civiltà del periodo anche al di fuori della penisola; ha permesso inoltre di acquisire una dotazione di reperti che ha reso possibile al Museo di esporre i risultati ottenuti ai visitatori legati al turismo culturale ed ai giovani e giovanissimi studenti fornendo, anche con tecniche multimediali, elementi preziosissimi di storia.

L'attività svolta però è stata necessariamente molto limitata rispetto al potenziale del sito. Il costo delle operazioni sviluppate con tecniche tradizionali è altissimo ed i tempi necessari elevati. Il Museo ha pertanto chiesto supporto alla ricerca al fine di completare la conoscenza relativa alla estensione del sito,



Fig. 1 Una Piroga recuperata dal Museo delle Civiltà

alla sua localizzazione più precisa in modo che futuri scavi possano essere più mirati e più economici.

ENEA, che aveva da tempo contatti con il Museo per studiare l'applicabilità di tecniche robotiche di superficie e subacquee, ha pertanto concepito, con l'aiuto del Museo, un progetto che punta ad utilizzare allo scopo tecnologie in proprio possesso, insieme a partner con i quali ha sviluppato nel tempo diverse attività di ricerca congiunta. Finalità ultima è l'analisi non invasiva a costi e tempi molto più contenuti di quelli tradizionali.

#### Un polo tecnologico laziale di archeologica subacquea

Per raggiungere questi obiettivi ci si è avvalsi di tre membri fondatori del DTC (ENEA, Università di Tor Vergata e CNR) in grado di fornire le tecnologie necessarie per le indagini e di due imprese che lavorano nel settore della tecnologia al servizio della valorizzazione dei beni culturali da oltre quindici anni.

Si è costruito quindi una squadra che sarà in grado non solamente di svi-

luppare la campagna di misura che è il cuore del progetto, ma anche di porre le basi per procedimenti analoghi in tutte le zone dei laghi del nord-nord ovest della Regione, dove vi sono forti indicazioni, quando non prove evidenti, di una civiltà ancora in larga misura sconosciuta. Si può prevedere anche la creazione di un eventuale polo tecnologico laziale di archeologica subacquea.

Il partenariato del Progetto è così costituito:

- Enea TERIN-SEN-RIA (Capofila)
- CNR Istituto di Acustica e Sensoristica "Orso Mario Corbino" (IDASC) Area della Ricerca CNR di Roma - Tor Vergata
- UniRoma 2 Tor Vergata Dipartimento di Ingegneria Elettronica
- Museo delle Civiltà L. Pigorini
- Ditta SUPERELECTRIC S.R.L.
- Ditta ES srl PROGETTI E SISTEMI

Il villaggio è sepolto da circa 10 metri di acqua e 2 di limo a circa 500 metri dalla costa; nel corso delle campagne di misura l'area sarà studiata, mediante strumenti ottici e acustici, generando una base di dati; a questi saranno poi affiancate le misure elettriche e successivamente generati documenti

multimediali per usi didattici e di ricerca. Infine sarà iniziato un tentativo di classificare e trattare i dati con strumenti di intelligenza artificiale al fine di individuare le caratteristiche delle zone più ricche per scavi futuri. Gli esperti del Museo Pigorini guideranno l'esecuzione delle campagne con la conoscenza pregressa del lavoro svolto in situ in questi ultimi venti anni. Il progetto LAHKE lavorerà in sinergia con il progetto RISES (Robotizzazione e Integrazione di Sistemi per la Esplorazione Subacquea) che insiste sulla stessa area di interesse ma con scopi leggermente diversi, maggiormente dedicati alla raccolta dei dati.

Il progetto prevede di utilizzare le seguenti tecnologie:

- Utilizzo di un sistema di un carrier robotizzato per la movimentazione della strumentazione di misura. I vantaggi, oltre alla precisione e ripetibilità delle misure, sono la elevata velocità con cui può essere esplorato e mappato un sito e il costo molto più ridotto rispetto a quello delle tecnologie tradizionali.
- Realizzazione di un modem acustico a larga banda per lo scambio di dati in acqua.
- Utilizzo di un sub bottom profiler ad alta definizione.
- Uso di un sistema di tomografia elettrica sul fondale (attualmente mediante l'uso di sub ma in prospettiva futura robotizzabile) di due tipi; uno semi tradizionale mediante cavo trascinato e un altro di tipo innovativo, di migliori prestazioni, con elettrodi piantati nel terreno e con un'emissione di energia molto più contenuta per una minore perturbazione del sistema lacustre.
- Integrazione di dati provenienti da sorgenti eterogenee per migliorare la risoluzione e per la caratterizzazione degli elementi significativi identificati (tipologia dei materiali, dislocazione dei materiali e dei manufatti).
- Fase iniziale dello sviluppo di tec-

nologie per la classificazione automatica e l'analisi intelligente dei dati al fine di disporre di capacità predittive sul «dove scavare»; tale sistema dovrebbe consentire, sulla base dei primi dati raccolti e/o di quelli già esistenti, di concentrare l'esplorazione ed il monitoraggio su aree con la massima probabilità di ritrovamento di manufatti e informazioni storiche.

### Attività di divulgazione e ruolo dei soggetti coinvolti

È prevista un'attività di divulgazione della conoscenza acquisita che vedono la collaborazione non solamente del team proponente ma anche delle autorità locali, che hanno la responsabilità di gestione del territorio e che sono disposte ad investire per valorizzarlo ulteriormente. Pertanto si prevede di sviluppare documentazione di tipo multimediale mediante l'uso di tecniche di story telling, per presentare non solamente i risultati della ricerca, ma la ricerca stessa in-

tesa come sfida per l'acquisizione di nuove conoscenze predisponendo materiale che potrebbe essere utilizzato in tempi successivi anche per la realizzazione di documentari a diffusione televisiva e/o sulla Rete.

Le mansioni dei partner possono essere così ripartite. **Il museo Pigorini è il punto di riferimento culturale del progetto.** Ha funzione di consulenza e di sostegno della validità della ricerca e cura gli aspetti di diffusione (Animazioni e altro) mantenendo i contatti con il territorio (comune di Anguillara, Ente Parco, etc...). ENEA cura l'allestimento, l'esercizio ed eventuali sviluppi specifici della strumentazione robotica avvalendosi sia di sistemi commerciali che di strumenti sviluppati nei propri laboratori. Uni-Roma2 si occupa prevalentemente del **modem acustico ad alta capacità**, il cui sviluppo è iniziato in passato congiuntamente con ENEA e che sarà utile per guidare gli archeologi in operazioni da remoto. Il CNR cura gli aspetti teorici e pratici della tomografia elettrica sia tradizionale che inno-

vativa, mediante elettrodi piantati sul fondo del lago. **SuperElectric** adatterà al carrier usato per l'acquisizione dati previsto dal progetto il proprio sistema di pianificazione di missione per droni. Es Sistemi curerà l'integrazione dei dati raccolti e di quelli esistenti (materiale acquisito da campagne precedenti), per una classificazione intelligente e predittiva e supporterà con la sua esperienza sul campo di scavo la campagna sul lago.

**Data la rilevanza del sito archeologico, sono già operativi progetti di collaborazione per lo studio dei reperti già disponibili tra il museo Pigorini e importanti università straniere (CSIC Spagna, Dipartimento Archeologia) già attivi sul sito e interessati a contribuire al progetto.** Questi soggetti saranno coinvolti nell'analisi dei risultati garantendo un elevato livello di internazionalizzazione e la possibilità di creare un network capace di proporre progetti anche nei programmi di finanziamento europei.

*Per info: ramiro.dellerba@enea.it*

### BIBLIOGRAFIA

1. R. Dell'Erba, C. Moriconi, and A. Trocciola, 'CAN ROBOTIC TECHNOLOGY SAVE CULTURAL ASSETS SUBMERGED?', ARCHEOMATICA-TECNOLOGIE PER I BENI CULTURALI, vol. 9, no. 3, pp. 22-26, 2018.
2. C. Moriconi and R. dell'Erba, 'The Localization Problem for Harness: A Multipurpose Robotic Swarm', in SENSORCOMM 2012, The Sixth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2012, pp. 327-333 [Online]. Available: [http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=sensorcomm\\_2012\\_14\\_20\\_10138](http://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=sensorcomm_2012_14_20_10138). [Accessed: Apr. 04, 2014]
3. M. A. Delpino and M. Mineo, "La piroga neolitica del lago di Bracciano ("La Marmotta 1"); con M.Mineo, in B.P.I., 86', pp. 197-266, Jan. 1995.

# Il Sistema di Supporto alle Decisioni CIPCast DSS per le aree storiche

A supporto della conservazione e della resilienza del patrimonio culturale e delle aree storiche l'ENEA ha sistematizzato numerose competenze presenti nei suoi Centri di Ricerca e customizzato con successo diverse tecnologie e know-how sviluppate in ambiti quali la ricerca nucleare, la diagnostica sismica dell'ingegneria civile e l'analisi di sistemi complessi. Un esempio di successo è il Sistema di Supporto alle Decisioni CIPCast DSS che consente di valutare l'impatto dei terremoti e monitorare la resilienza delle aree storiche in chiave smart.

DOI 10.12910/EAI2022-027

di Sonia Giovinazzi, Ludovica Giordano, Antonio Di Pietro, Maria Luisa Villani, Antonio De Nicola, Maurizio Pollino, Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche, European Infrastructure Simulation and Analysis Centre, Italian node (EISAC.it) e Vittorio Rosato, Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche - ENEA

I centri storici delle nostre città, i borghi e le frazioni, nonché i paesaggi naturali storici, svolgono un ruolo primario nella vita e nel benessere della comunità; fanno parte del tessuto sociale, dei luoghi in cui viviamo, e rappresentano il nostro legame culturale con il passato che deve essere preservato e trasmesso alle generazioni future. Il patrimonio culturale, materiale e immateriale, conservato nelle aree storiche rappresenta, inoltre, un valore inestimabile per l'economia, il benessere e lo sviluppo delle comunità locali.

Purtroppo i fenomeni naturali estremi, quali i terremoti e fenomeni indotti da cambiamenti climatici, stanno mettendo a serio rischio la conservazione, se non la sopravvivenza di tali aree. Riconoscendo ciò, l'UN Agenda 2030 for Sustainable Development<sup>1</sup> raccomanda di rafforzare gli sforzi per proteggere e salvaguardare il patrimonio culturale e naturale del

mondo e l'UN Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030<sup>2</sup> sottolinea l'imperativa necessità di tenere conto del patrimonio culturale nella pianificazione di strategie di resilienza alle catastrofi.

Il nostro Paese è molto esposto a pericoli naturali di varia natura e intensità, quali ad esempio dissesti idrogeologici, terremoti, frane, e fenomeni meteo estremi indotti dai cambiamenti climatici. Questi fenomeni sono a volte esacerbati dalla inadeguata progettazione e manutenzione di strutture e infrastrutture, dalla pressione antropica e dallo sfruttamento, a volte incontrollato, delle risorse naturali. Le aree storiche sono tra le più vulnerabili a tali fenomeni, che possono causare gravi impatti, se non la loro totale distruzione o abbandono da parte della popolazione locale.

L'ENEA ha sistematizzato le numerose competenze presenti nei suoi Centri di Ricerca, diffusi in tutta Italia, e nei diversi Dipartimenti, e

customizzato con successo diverse tecnologie e know-how a supporto della conservazione e della resilienza del patrimonio culturale e delle aree storiche; a tal fine sono state messe a sistema e adeguate tecnologie e competenze sviluppate nell'ambito di diversi ambiti di ricerca e sviluppo tra cui la ricerca nucleare, la diagnostica sismica dell'ingegneria civile e l'analisi di sistemi complessi.

## Il Sistema di Supporto alle Decisioni CIPCast DSS

Un esempio positivo è stato la customizzazione e utilizzo del Sistema di Supporto alle Decisioni CIPCast DSS, Critical Infrastructure Protection Forecasting, Decision Support System, originariamente concepito e sviluppato dal laboratorio per l'Analisi e la Protezione delle Infrastrutture Critiche per la protezione di infrastrutture critiche distribuite [1], per supportare

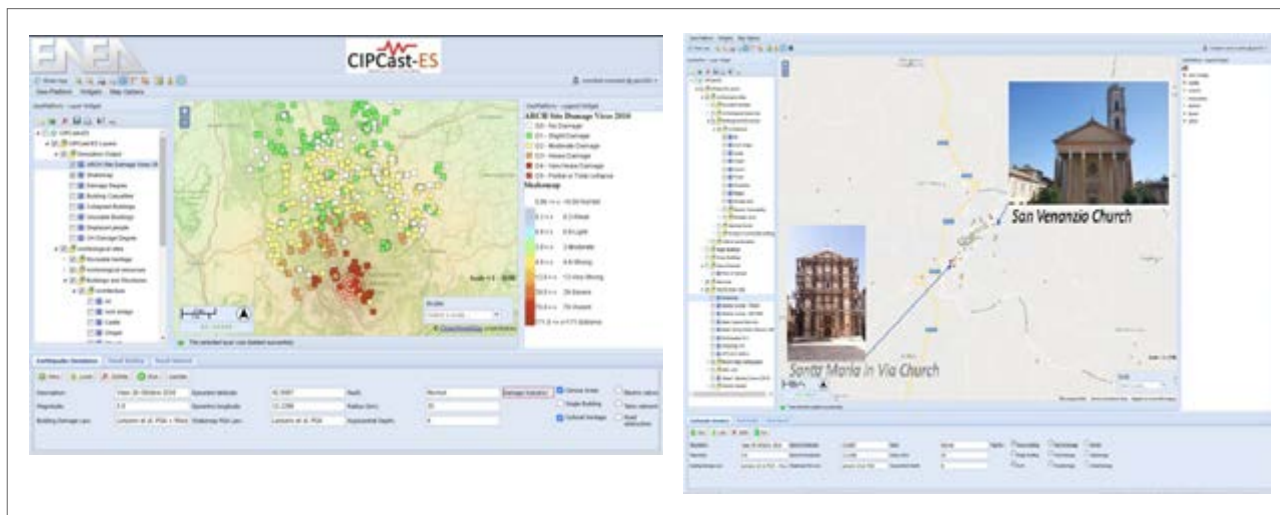


Fig. 1 Scenari di impatto fisico realizzati con CIPCast DSS nel distretto storico culturale di Camerino-San Severino per stimare il danno fisico e monitorare il processo di ricostruzione dei beni vincolati a seguito del terremoto di Visso (26 ottobre 2016, Mw=5,9).

i processi decisionali relativi alla resilienza delle aree storiche ai terremoti [2].

Nell'ambito del progetto Europeo ARCH *Advancing Resilience of Historic Areas Against Climate-Related and Other Hazards*, finanziato dalla Commissione Europea (programma quadro Horizon 2020), CIPCast DSS è stato utilizzato per simulare scenari di danno sismico, per generare cioè informazioni relative all'estensione dell'impatto e alla gravità dello stesso indotto da terremoti di diversa intensità [3].

A partire dalle informazioni generate grazie alle capacità simulate di CIPCast DSS è stata quindi generata conoscenza che potesse supportare i diversi processi decisionali nelle diverse fasi che portano alla resilienza a fenomeni catastrofici, cioè:

- nel *business as usual*, prima del verificarsi di un evento, per: pianificare azioni di mitigazione volte a ridurre i possibili impatti futuri; creare consapevolezza nella popolazione e nei decisori; e promuovere la capacità di risposta resiliente delle comunità;
- all'occorrenza di un evento per: informare e supportare la fase di

gestione dell'emergenza fornendo ai soccorritori la stima della localizzazione e dell'entità dei danni e degli impatti; e monitorare e supportare la fase di risposta e ricostruzione resiliente.

**Per raggiungere questo ambizioso obiettivo sono stati realizzati da ENEA delle dashboard (in italiano cruscotti) di facile utilizzo, denominate ARCH DSS, che consentono di organizzare, visualizzare, interrogare e confrontare in modo immediato e efficace, le informazioni generate dal simulatore CIPCast DSS per i processi decisionali sopra descritti.** Le dashboard ARCH DSS consentono di creare conoscenza elaborando e presentando in modo sintetico diverse informazioni e mettendo in evidenza quali sono i fattori che generano il rischio (cioè la co-presenza di pericolosità, esposizione, e vulnerabilità degli elementi esposti) in modo che il decisore possa agire in modo efficace su ciascuno di essi. La funzionalità delle dashboard ARCH DSS per supportare i processi decisionali, anche in modo partecipativo, sono già state testate

con successo nell'ambito di diversi incontri con i decisori locali di Camerino e nell'ambito di sessioni di serious gaming organizzate con decisori di diverse città europee.

Le dashboard ARCH DSS hanno facilitato la discussione e la conciliazione delle diverse e spesso conflittuali esigenze dei decisori e della popolazione locale durante la definizione di piani di gestione dell'area storica e del patrimonio culturale, inclusi piani di mitigazione del rischio e piani di ricostruzione post disastro. Le dashboard ARCH DSS, hanno consentito ai decisori e alla popolazione di prendere consapevolezza e di trovare risposte a domande, quali per esempio *"cosa succederebbe se un terremoto, più forte di quello già accaduto secoli fa in questa stessa area, accadesse ancora? in che misura ne risentirebbe il patrimonio culturale e la comunità locale? Come scegliere tra diverse strategie per garantire la sicurezza dell'edificato conservando le peculiarità del patrimonio monumentale e preservando la dimensione sociale e la prosperità delle economie locali?"*.

Grazie al successo riscontrato, le funzionalità delle dashboard ARCH

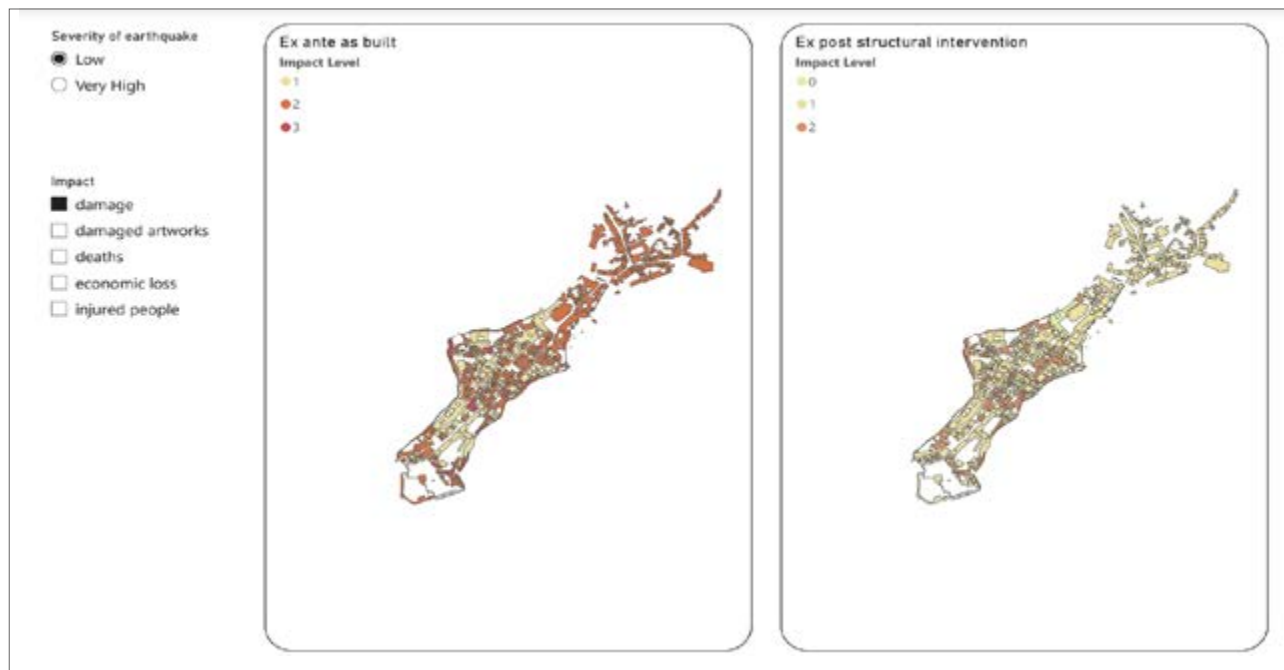


Fig. 2 Esempio di Dashboard ARCH DSS realizzata da ENEA per il centro storico di Camerino attraverso la quale è possibile visualizzare in modo molto semplice la riduzione degli impatti grazie all'implementazione di interventi strutturali, per un terremoto di media intensità: a sinistra danni previsti prima degli interventi; a destra dopo gli interventi [3].

DSS saranno integrate, nell'ambito del progetto ARCH, in un quadro di valutazione della resilienza basato sull'approccio *Disaster Resilience Scorecards* [4] definito da *United Nations Office for Disaster Risk Reduction UNDRR* per sostenere la formulazione di piani globali di azioni di resilienza per le aree storiche in accordo con il Ciclo di adattamento urbano<sup>3</sup>. E' doveroso ricordare inoltre che gli approcci e le tecnologie definite nell'ambito del progetto ARCH sono state incorporate nel documento del CEN Comitato Europeo di Normazione prCWA 17727:2022 denominato *'City Resilience Development - Framework and guidance for implementation with a specific focus on historic areas'*.<sup>4</sup>

In collaborazione con i diversi Dipartimenti di ENEA il connubio CIPCast e ARCH DS sarà ulteriormente potenziato per consentire la gestione e visualizzazione di dati

dinamici (cioè i dati che variano nel tempo raccolti in tempo reale

grazie all'uso di sensori IoT, *Internet of Things*) in modo da poter di-



Fig. 3 ARCH DSS rappresentato all'interno della piramide DIKW (Data-Information-Knowledge-Wisdom, in italiano Dati-Informazioni-Conoscenza-Saggezza, nota anche come "Gerarchia della conoscenza"): ARCH DSS genera conoscenza a partire dalle informazioni prodotte da CIPCast DSS. La possibilità di passare dalla conoscenza alla generazione della saggezza può essere raggiunta attraverso un processo cognitivo svolto da un esperto umano o in modo automatico/semiautomatico grazie a un cyber-esperto [5][6]

ventare una piattaforma in cui indicatori chiave relativi alla resilienza di beni vincolati e delle aree storiche nel loro insieme possono essere monitorati dinamicamente per verificare l'efficacia delle strategie di risposta e ripristino post emergenza e di resilienza nel *business as usual*.

Si sta inoltre lavorando affinché CIPCast ARCH DSS, da semplice dashboard possa diventare, grazie all'utilizzo di modelli basati su AI *Artificial Intelligence* (intelligenza artificiale) e Agent Based-modeling (modellazione basata su agenti) un modello di gemello digitale

(Digital Twin) dell'area storica, per supportare la resilienza delle aree storiche e delle comunità locali in una prospettiva intelligente e olistica [5] [6] (Figura 3).

Per info: [sonia.giovinazzi@enea.it](mailto:sonia.giovinazzi@enea.it)

#### BIBLIOGRAFIA

1. Di Pietro, A.; Lavalle, L.; La Porta, L.; Pollino, M.; Tofani, A.; Rosato, V. Design of DSS for Supporting Preparedness to and Management of Anomalous Situations in Complex Scenarios. In *Managing the Complexity of Critical Infrastructures, A Modelling and Simulation Approach*; Setola R., Rosato V., Kyriakides E., Rome E., Eds.; Springer: 2016, pp.195-232.
2. Matassoni, L.; Fiaschi, A.; Giovinazzi, S.; Pollino, M.; La Porta, L.; Rosato, V. A geospatial decision support tool for seismic risk management: Florence (Italy) case study. *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017*. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Part II, LNCS 10405, pp. 278-293, Springer International Publishing, 2017.
3. Giovinazzi, S., Marchili, C., Di Pietro, A., Giordano, L., Costanzo, A., Porta, L.L., Pollino, M., Rosato, V., Lückerrath, D., Milde, K., Ullrich, O. (2021). Assessing earthquake impacts and monitoring resilience of historic areas: Methods for gis tools. *ISPRS International Journal of Geo- Information*, 10 (7), art. no. 461.
4. United Nations office for Disaster Risk Reduction: Disaster Resilience Scorecard for Cities. 2017. Available online: <https://www.undrr.org/publication/disaster-resilience-scorecard-cities> (accessed on 06 May 2021).
5. Coletti, A., De Nicola, A., Di Pietro, A., La Porta, L., Pollino, M., Rosato, V., Vicoli G., Villani, M. L. (2020). A comprehensive system for semantic spatiotemporal assessment of risk in urban areas. *Journal of Contingencies and Crisis Management*. 28. 178-193. 10.1111/1468-5973.12309.
6. De Nicola, A., Villani, M. L. (2021) Smart City Ontologies and Their Applications: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13, 5578. <https://doi.org/10.3390/su13105578>

1. <https://www.agenziacoazione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/?lang=en>
2. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
3. <https://climate-adapt.eea.europa.eu/knowledge/tools/urban-as>
4. [https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/News/Workshops/2022/2022-02-11%20-%20City%20Resilience/prcwa\\_17727-2022.pdf](https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/News/Workshops/2022/2022-02-11%20-%20City%20Resilience/prcwa_17727-2022.pdf)





# La salvaguardia dei beni culturali dai rischi naturali e antropici

Le strutture storiche sono state costruite senza tener conto delle azioni orizzontali risultando molto vulnerabili alle azioni sismiche e alle vibrazioni indotte dal traffico. Il rilievo di vibrazioni ambientali e forzate consente di valutare il comportamento dinamico di una struttura monumentale e di tarare un modello matematico, indispensabile per stimarne lo stato di salute e definire eventuali interventi. Sin dagli anni '80 l'ENEA ha eseguito rilievi di vibrazioni su diversi monumenti tra cui l'Obelisco Flaminio, il Colosseo, l'Arco di Costantino, il Duomo di Orvieto e la Villa dei Misteri di Pompei.

DOI 10.12910/EAI2022-028

di Paolo Clemente, Laboratorio di Analisi e protezione delle infrastrutture critiche - ENEA

**L**a storia insegna che molti monumenti sono stati distrutti da eventi naturali e i terremoti rappresentano la più comune

causa di collasso. D'altra parte, l'invecchiamento naturale dei materiali, l'erosione dovuta al vento, alla pioggia e all'inquinamento e agli effetti delle

escursioni termiche, possono determinare un continuo deterioramento delle superfici esposte con una significativa riduzione della resistenza

dei materiali e, quindi, della capacità strutturale. Questo processo può essere accelerato dagli effetti delle vibrazioni indotte dal traffico, col risultato di incrementare la vulnerabilità alle azioni statiche e dinamiche o, perfino, favorire un crollo improvviso in caso di sisma.

In molti casi, le strutture storiche sono state costruite senza tener conto delle azioni orizzontali e, pertanto, sono molto vulnerabili alle azioni sismiche e alle vibrazioni indotte dal traffico, queste ultime diventate importanti soltanto nella seconda metà del ventesimo secolo. Va ricordato che il comportamento di una struttura storica è alquanto complesso a causa di diversi fattori, tra cui la scarsa conoscenza dell'effettiva geometria e delle caratteristiche dei materiali, nonché delle condizioni di vincolo interne e esterne. Pertanto, i modelli strutturali necessitano di opportune validazioni sperimentali che possono essere perseguite mediante prove dinamiche e, a tal fine, le vibrazioni indotte dal traffico rappresentano una sollecitazione continua, disponibile a costo zero.

Le problematiche evidenziate sono amplificate per siti e strutture archeologiche, a causa dei danni legati agli eventi passati e, in alcuni casi, all'assenza di un'adeguata manutenzione. L'importanza storica di questi siti impone un impegno per la loro conservazione. Sono, infatti, attrazioni per i turisti, con significativi ritorni economici, e quindi necessitano di un adeguato controllo e manutenzione al fine di garantirne la conservazione unitamente ad un accettabile grado di sicurezza.

### Le potenzialità dell'analisi sperimentale vibrazionale

Le potenzialità dell'analisi sperimentale vibrazionale erano state intuite dai ricercatori dell'ENEA sin dagli anni '80 dello scorso secolo, quando organizzarono un importante progetto che prevedeva campagne di rilievi di vibra-



Fig. 1 La parete nord vista dall'interno

zioni su diversi monumenti di Roma, tra cui le Colonne Coclidi, l'Obelisco Flaminio, il Colosseo, l'Arco di Costantino, il Tempio di Minerva Medica e altri. Ciascuna struttura fu strumentata con una rete di velocimetri. I rilievi di vibrazioni furono eseguiti in diverse condizioni di traffico e i dati furono analizzati nel dominio del tempo e della frequenza, evidenziando i valori massimi delle vibrazioni e le caratteristiche dinamiche delle strutture. Alcuni di essi, come le Colonne Coclidi e il Colosseo, sono stati oggetto di ulteriori e anche recenti campagne sperimentali. Negli anni successivi, lo studio delle vibrazioni ambientali e indotte dal traffico ha riguardato altre strutture monumentali. Tra queste:

- Villa Farnesina, protetta da una pavimentazione antivibrante posta al di sotto della pavimentazione stradale del vicino Lungotevere; lo studio ha permesso di verificare il corretto funzionamento della pavimentazione, realizzata nel 1971 su progetto di Gustavo Colonnetti;
- il Tempio Rotondo al Foro Boario, per il quale la Sovrintendenza Archeologica di Roma aveva avviato un programma di lavori per il consolidamento strutturale;
- il Duomo di Orvieto, dove per effetto del sisma del 1997 si erano aperte alcune preoccupanti lesioni nella volta della Cappella del Corporale;
- l'Obelisco Lateranense, oggetto di un approfondito studio sui materiali, mediante prove soniche, e sulla struttura, mediante rilievo di vibrazioni ambientali e indotte dal traffico.

Vibrazioni dovute a terremoti reali sono state, invece, registrate sul campanile medievale della chiesa di S. Giorgio a Trignano, gravemente danneggiato dal terremoto di Reggio Emilia del 15 ottobre 1996 (Ml = 4,8). Una prima caratterizzazione dinamica è stata eseguita subito dopo l'evento sismico; sono stati quindi installati un accelerometro triassiale sul basamento e tre accelerometri orizzontali in sommità per registrare gli effetti delle repliche. In circa due mesi sono stati registrati sessantasette terremoti di bassa magnitudo; l'analisi dei dati ha evidenziato importanti cambiamenti delle frequenze di risonanza e dello smorzamento in funzione dell'energia trasmessa al piede della torre. Il campanile è stato infine riparato con miglioramento sismico, utilizzando dispositivi in lega a memoria di forma. Un evento sismico, verificatosi pochi mesi

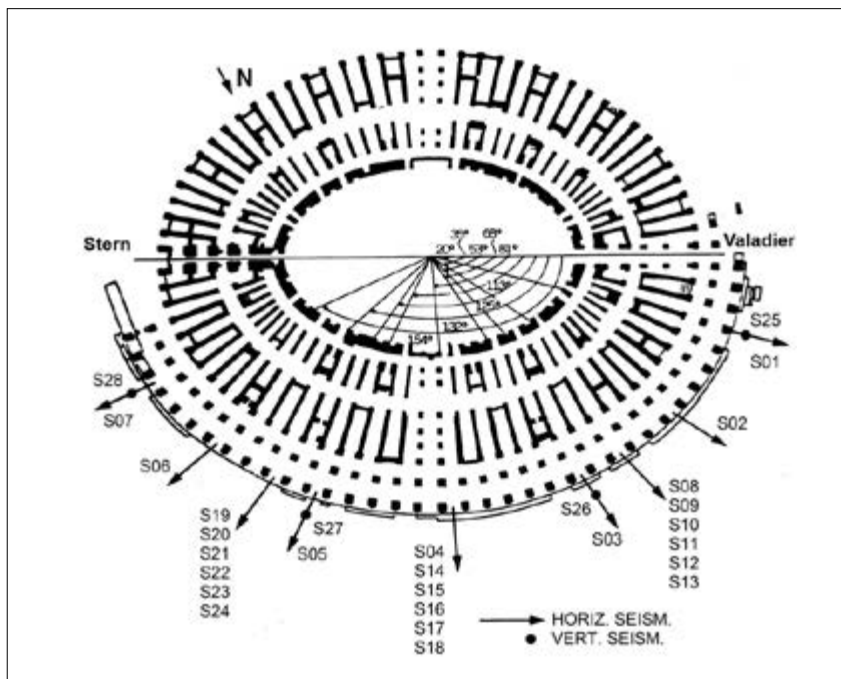


Fig. 2 Posizionamento dei sensori sulla parete del Colosseo.

dopo la fine dei lavori, ha certificato la bontà dell'intervento.

Tra le applicazioni agli edifici storici si ricordano il monitoraggio sismico del Centro di Documentazione e Ricerca Antropologica della Valle Nerina (CEDRAV) di Cerreto di Spoleto, danneggiato dalla sequenza sismica Umbro-Marchigiana del 1997, e del Palazzo Marchesale a San Giuliano di Puglia, dove è stata installata una rete accelerometrica fissa e sono stati registrati alcuni terremoti. Entrambi gli edifici sono irregolari sia in pianta che in elevazione; le registrazioni sismiche hanno permesso di evidenziare alcune caratteristiche del loro comportamento dinamico e della loro vulnerabilità, e di mettere a punto modelli ad elementi finiti piuttosto complessi ma efficaci nell'interpretare il comportamento osservato durante gli eventi.

#### Per la Villa dei Misteri droni e test diagnostici

Nell'ambito della valutazione dello stato delle coperture di protezione di Villa dei

Misteri, una delle domus più famose dell'antica città di Pompei, è stato condotto uno studio dettagliato attraverso un approccio multidisciplinare. Oltre a test diagnostici in situ e in laboratorio e telerilevamento mediante l'uso di droni per ispezionare aree e coperture non facili da raggiungere in sicurezza, sono state eseguite anche le misurazioni delle vibrazioni ambientali come base per la valutazione della sicurezza sismica, nonché per la caratterizzazione dinamica del suolo e l'analisi degli effetti della trincea che circonda la Villa su tre lati. Tra le applicazioni più recenti, va ricordato il rilievo delle vibrazioni sulla Tor-

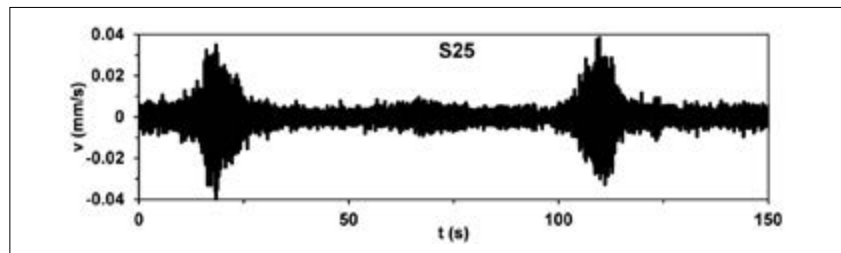


Fig. 3 Registrazione in direzione verticale (S25). Sono evidenti due passaggi della metropolitana.

re della Moletta e le rovine del Circo Massimo a Roma, eseguito nel settembre 2019, prima, durante e dopo il concerto di un famoso gruppo, nell'ambito di un intervento di conservazione di quest'area archeologica. I risultati hanno evidenziato differenze di ampiezza ma anche in termini di contenuto in frequenza delle registrazioni durante il concerto rispetto a prima e dopo, e che il comportamento dinamico del terreno e delle strutture, come prevedibile, è fortemente influenzato dalla presenza di strutture interrato.

#### La parete nord del Colosseo

Come esempio, si riporta di seguito lo studio eseguito sul Colosseo, sul quale sono state condotte due campagne sperimentali, rispettivamente nel 1985 e nel 2014. La sperimentazione ha riguardato, in particolare, la parete nord (Figura 1) sulla quale sono stati disposti nella prima campagna 13 velocimetri in diverse configurazioni (Figura 2): 7 di essi (S01 - S07) sono stati tenuti sempre in sommità della parete, in direzione radiale, gli altri 6 sono stati disposti in tre diversi allineamenti verticali (S08-S13, S14-S18, S19-S24). L'analisi nel dominio del tempo ha evidenziato vibrazioni di maggiore ampiezza in prossimità dell'estremità ovest della parete, durante i passaggi della metropolitana. L'analisi spettrale ha consentito di ricavare le proprietà dinamiche della parete, ossia le frequenze di risonanza e le forme modali associate. Le prime due riguardano gli speroni, dello Stern e del Valadier ri-



Fig. 3 Posizionamento di una terna di velocimetri.

spettivamente; le successive impegnano l'intera parete. I principali risultati possono essere così riassunti:

- alcune coppie di forme modali sono

all'incirca simmetriche rispetto al centro della parete (S04);

- le ampiezze modali sono sempre molto basse in S04, che quindi è un nodo per tutte le forme modali;
- in corrispondenza dei sensori S11, S16 e S22, rispettivamente per la prima, seconda e terza verticale, è evidente nelle forme modali una variazione della rigidità della parete;
- i valori di vibrazione alla base non sono trascurabili, pertanto l'interazione suolo-struttura dovrebbe essere analizzata in dettaglio;
- gli spostamenti lungo gli allineamenti verticali non sempre aumentano verso l'alto ma le forme modali presentano variazioni nel segno della derivata; questo aspetto è correlato alle irregolarità del collegamento tra il muro esterno e gli altri elementi strutturali;
- alcune frequenze evidenziate da questa analisi potrebbero non essere

associate effettivamente ad una forma modale; ulteriori informazioni potrebbero essere ottenute mediante il confronto con i risultati di un opportuno modello numerico.

L'analisi delle registrazioni di sensori in direzione verticale (S25-S28) ha evidenziato ancora l'influenza dei passaggi del treno metropolitano (Figura 3), che si risentono molto meno man mano che ci si allontana (S26-S28). Con altre configurazioni sono state analizzati i moti dei due speroni e quelli in direzione tangenziale alla parete.

**In definitiva, l'analisi delle vibrazioni rappresenta uno strumento di diagnosi per le strutture e, in particolare, per quelle di interesse storico e artistico: misuro come vibri e ti dirò come stai.**

*Per info: [paolo.clemente@enea.it](mailto:paolo.clemente@enea.it)*

## BIBLIOGRAFIA

1. Bergamasco I., Carpani B., Clemente P., Papaccio V. (2012). "Seismic preservation of archeological sites: the case of Pompeii". In Jasienko J. (ed), *Structural Analysis of Historical Constructions*, 2: 1386-1394.
2. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F. (2017). "Dynamic characteristics of the Amphitheatrum Flavium northern wall from traffic-induced vibrations". *Annals of Geophysics*, 60(4): S0439.
3. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F. (2017). "Experimental vibration analyses of a historic tower structure". *J. Civil Structural Health Monitoring*, 7(5): 601-613.
4. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Saitta F. (2021). "Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column". *Int. J. of Architectural Heritage*, 15(1): 64-78.
5. Bongiovanni G., Celebi M., Clemente P. (1990). "The Flaminio Obelisk in Rome: vibrational characteristics as part of preservation efforts". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(1): 107-118.
6. Buffarini G., Clemente P., Paciello A., Rinaldis D. (2008). "Vibration Analysis of the Lateran Obelisk". *Proc. of the 14th WCEE*, Paper S11-055.
7. Clemente P., Rinaldis D. (1998). "Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(5): 289-296.
8. Clemente P., Rinaldis D., Bongiovanni G. (1994). "Dynamic characterization of the 'Tempio della Minerva Medica'". *Proc. of the 10ECEE*, 2: 981-986, Balkema.
9. Clemente P., Rinaldis D., Buffarini G. (2007). "Experimental seismic analysis of a historical building". *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(8): 777-784.
10. De Stefano A., Matta E., Clemente P. (2016). "Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences". *J. of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1): 83-106.
11. Puzzilli L., Bongiovanni G., Clemente P., Di Fiore V., Verrubbi V. (2021). "Effects of Anthropogenic and Ambient Vibrations on Archaeological Sites: The Case of the Circus Maximus in Rome". *Geosciences* 2021, 11: 463.

# Il progetto MONALISA

Il progetto Monitoraggio Attivo e Isolamento da vibrazioni e Sismi di oggetti d'Arte (MONALISA) si basa sull'utilizzo di dispositivi innovativi per effettuare il controllo delle vibrazioni sismiche e di quelle indotte dal traffico sugli oggetti d'arte.

DOI 10.12910/EAI2022-029

di Luigi Sorrentino, Omar Al Shawa, *Sapienza Università di Roma*, Maria Aurora Vincenti, Paolo Clemente - *ENEA* - Fabrizio Paolacci, Marialaura Malena, *Università Roma Tre*, Chiara Castino, Anna Maria Cicalese, *Somma srl*, Miriam Lamonaca, Maria Paola Guidobaldi, *Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia, Roma*

**L**a **Smart Specialisation Strategy della Regione Lazio**<sup>1</sup> riconosce la notevole rilevanza del valore aggiunto creato dal sistema produttivo culturale per il Lazio, più che in qualunque altra regione d'Italia. Il principale contributo sono sicuramente le entrate dei musei, dei quali è quindi necessario **tutelare gli oggetti d'arte, in particolare quelli più iconici perché di maggior richiamo per il pubblico culturale italiano e internazionale**. Questi oggetti sono spesso molto vulnerabili per ragioni storiche, quali la realizzazione con materiali fragili e i danneggiamenti subiti nel passato, ma anche per minacce naturali e antropiche.

**Il pericolo naturale più rilevante è costituito dai terremoti**. L'evento sismico del 24 agosto 2016, il primo della sequenza Amatrice-Norcia-Visso del 2016-17, oltre a provocare un ingente numero di vittime e senzatetto, ha colpito il Museo Cola Filotesio di Amatrice e gli oggetti d'arte che custodiva. Nelle settimane successive sono stati recuperati ben 85 beni mobili, tra i quali il reliquiario realizzato dall'orafo ascolano Pietro Paolo Vannini nel 1472 e dedicato alla Madonna di Filetta, patrona di Amatrice. In precedenza il terremoto dell'Aquila del 2009 aveva causato estesi danneggiamenti alle sculture custodite nel Forte Spagnolo, non per il crollo

delle strutture murarie che le ospitavano, bensì per il ribaltamento dei singoli beni mobili. **L'elenco delle perdite di oggetti d'interesse storico e artistico, dovute a sismi, potrebbe andare anche molto indietro nel tempo ed estendersi a numerose nazioni in aree esposte ai terremoti**.

## La vulnerabilità sismica degli oggetti d'arte e le vibrazioni da traffico

**La vulnerabilità sismica degli oggetti d'arte richiede un'attenta disamina delle caratteristiche geometriche e di allestimento, che determinano le condizioni di vincolo**. Numerosi studi sono stati svolti nell'ambito dell'analisi di vulnerabilità dei musei archeologici. Per la protezione sismica degli oggetti d'arte, al fine di limitare le sollecitazioni soprattutto su oggetti pesanti o realizzati con materiali fragili, **l'isolamento alla base rappresenta un'efficace soluzione**. Esso consiste nell'inserire dispositivi con bassa rigidità in direzione orizzontale al fine di disaccoppiare il moto dell'oggetto da proteggere rispetto a quello del suo basamento, che rimane vincolato alla fondazione o al solaio. Il risultato è la notevole riduzione delle azioni sismiche sull'oggetto e, quindi, dei danneggiamenti anche in occasione di eventi sismici violenti.

Va detto che l'isolamento alla base per oggetti d'arte è stato già proposto in diversi casi ma è stato finora impiegato soltanto poche volte. Tra le applicazioni di maggiore interesse, si citano l'**Erme di Prassitele al museo archeologico di Olimpia**, **Le Porte dell'Inferno di Rodin al museo nazionale di Arte Occidentale a Tokyo** (con dispositivi a pendolo attrittivo), alcuni beni mobili al **museo J. Paul Getty a Los Angeles** (con sistemi a molle), **la Pietà Rondanini nel Castello Sforzesco a Milano** (sistema di protezione dalle vibrazioni), **i Bronzi di Riace** (con dispositivi attrittivi), **il gruppo dell'Annunciazione di Francesco Mochi nel Duomo di Orvieto** con elementi dissipativi composti da funi di acciaio inossidabile con funzione anche di limitazione di spostamento e ricentraggio.

Oltre alle fonti di vibrazioni naturali, come il sisma, vanno considerate quelle di tipo antropico, come le **vibrazioni indotte dal traffico**. I mezzi di trasporto, infatti, inducono vibrazioni nel terreno, che vengono trasmesse agli edifici adiacenti e, quindi, al loro contenuto. Si tratta di vibrazioni di ampiezza molto minore rispetto a quelle dovute ai terremoti violenti, ma che presentano caratteristiche diverse, sia nel contenuto in frequenza sia nella durata e nel numero di rinnovi. Soprattutto nei casi di vibra-



Fig.1 Il "Sarcophago degli Sposi" nel Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma

zione praticamente continua almeno per alcune parti di ogni giorno, la sollecitazione ripetuta può provocare piccoli danneggiamenti che si sovrappongono ai precedenti, specie in oggetti realizzati con materiali fragili, o indurre fenomeni di fatica.

Tra i mezzi di trasporto più diffusi e pericolosi nell'ottica delle vibrazioni indotte sugli oggetti d'arte, vanno annoverati **treni e tram**, che ben si prestano alle politiche di contenimento delle emissioni di gas serra e di riduzione dell'uso dello spazio nell'ottica di implementazione, potenziamento e sviluppo di sistemi integrati di trasporto rapido di massa. Al fine di evitare l'accumulo di danneggiamenti nel tempo negli

edifici, le normative tecniche indicano valori limite per le velocità di picco che tuttavia possono risultare non idonei alla corretta conservazione di edifici monumentali e oggetti museali, come evidenziato da numerose esperienze precedenti.

#### Il sarcofago degli sposi a Villa Giulia

**Tali problematiche sono affrontate nel progetto di ricerca e sviluppo industriale finanziato dalla Regione Lazio MONALISA nel quale si considera come caso studio il "Sarcophago degli Sposi" (Figura 1).** Questo oggetto d'arte è custodito nel Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma, che risente

delle vibrazioni indotte dalla adiacente linea tranviaria e dalla linea ferroviaria Roma Nord-Viterbo, che interessa l'estremità est dell'area museale. Il sarcofago è una scultura etrusca in terracotta che risale al VI secolo a.C. ed è stato riportato alla luce nel 1881 durante scavi nella necropoli della Banditaccia a Cerveteri. La scultura raffigura una coppia di sposi semidistesi, in posizione di perfetta parità a dimostrare la parità di diritto e dignità delle donne rispetto agli uomini della cultura etrusca, che non trovava riscontro nella cultura greca né in quella romana.

Al momento del ritrovamento il manufatto si presentava in più di 400 frammenti, ricomposti nel corso del primo

Il progetto MONALISA è risultato primo classificato, su 81 domande delle quali 56 giudicate ammissibili, all'Avviso pubblico di LAZIO INNOVA, società in house della Regione Lazio, Accordo di programma quadro "Ricerca, Innovazione Tecnologica, Reti Telematiche" (APQ6) - Stralcio "Attuazione degli interventi programmatici e dei nuovi interventi relativi al Distretto Tecnologico per le nuove tecnologie applicate ai beni e alle attività culturali". Intervento TE1 - Invito al Centro di Eccellenza a presentare progetti per la seconda fase - Progetti RSI (Det. G07413 del 16.06.2021, pubblicata sul BURL n. 61 del 22.06.2021, Atto di Impegno del 18.10.2021). Partner del progetto sono: Sapienza Università di Roma, ENEA, Università Roma Tre, Somma srl. È stato sottoscritto un apposito accordo di collaborazione scientifica con il Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma, per l'accesso alla documentazione e ai luoghi ove eseguire l'intervento di protezione dalle vibrazioni.

intervento di restauro di fine '800. Dall'analisi dello stato di conservazione emerge che il problema conservativo principale è di tipo strutturale, correlato al sistema di ricomposizione dei fram-

menti e ai supporti inseriti nella parte interna, alla distribuzione dei carichi e alla limitata resistenza meccanica della terracotta dovuta ad una cottura a basse temperature (700-750°C). Le molte-

plici linee di frattura rappresentano il punto di debolezza del manufatto; le vibrazioni causano un aggravamento dello stato di conservazione generale, con conseguente riapertura delle fratture, formazione di nuove fessurazioni e rischio di cadute di materiale. L'isolamento dalle vibrazioni del Sarcofago si inserisce pertanto, insieme al prossimo restauro dell'opera, nel quadro delle misure finalizzate alla conservazione a lungo termine dei materiali e alla tutela del bene per la pubblica fruizione.

Il progetto prevede la realizzazione di una nuova piattaforma metallica, sulla quale alloggiare il sarcofago con la sua vetrina, poggiante su dispositivi di isolamento, appositamente progettati per proteggere la scultura sia dalle quotidiane vibrazioni da traffico sia da quelle eccezionali dovute ai terremoti. Per limitare le prime i dispositivi dovranno garantire un isolamento anche in direzione verticale, usualmente trascurata nel caso di sola protezione sismica. La tecnica potrà facilmente essere adattata ad altre situazioni museali, ma anche in contesti industriali o di telecomunicazioni.

Ai fini del progetto è prevista un'accurata analisi delle caratteristiche delle vibrazioni indotte dal traffico veicolare e ferroviario mediante rilievi di vibrazioni nell'arco di 24 ore. Il progetto prevede la sperimentazione preventiva su tavola vibrante di una replica del sarcofago dotata del sistema di isolamento proposto. Il sistema di isolamento e l'oggetto protetto saranno anche dotati di un si-

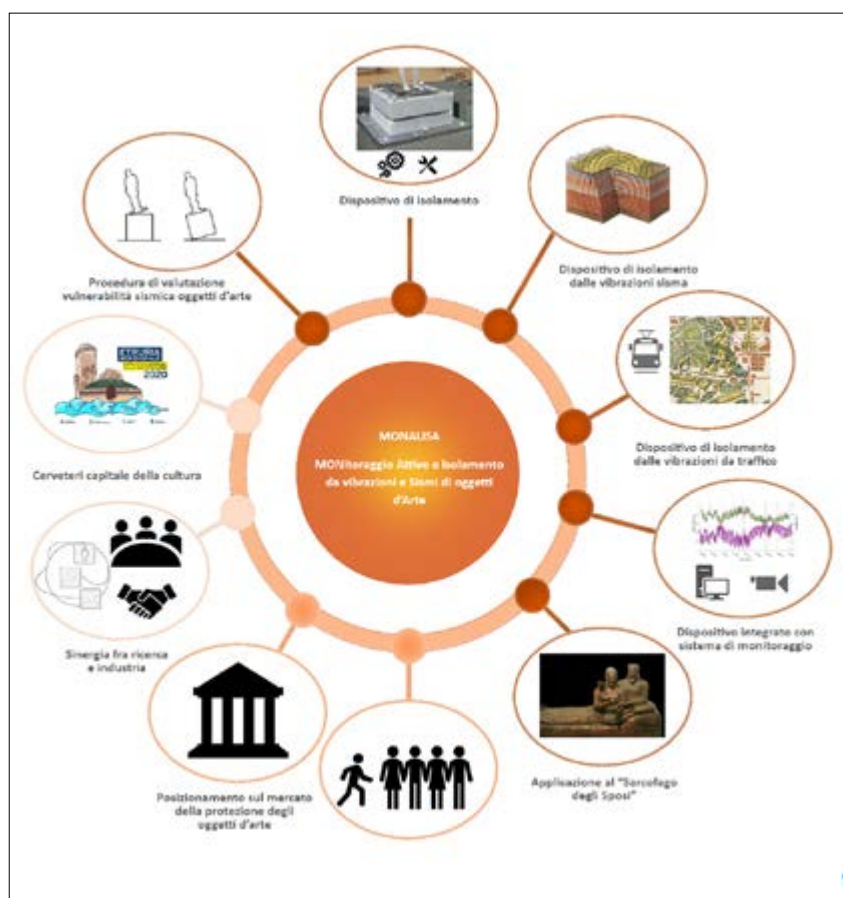


Fig.2 Principali obiettivi, risultati economici e risultati indiretti del progetto MONALISA



stema di monitoraggio permanente con sensori in fibra ottica, che consentirà di valutare l'efficacia del sistema di isolamento stesso ma anche di trarre informazioni utili allo sviluppo di sistemi e dispositivi sempre più efficaci. Inoltre, potrà evidenziare eventuali malfunzionamenti o degrado sia dell'oggetto protetto sia del sistema di isolamento. Saranno monitorati, in particolare, parametri ambientali (quali temperatura e umidità, vibrazioni da cause naturali ed antropiche, illuminazione), di comportamento e ammaloramento (come ad esempio quadro fessurativo, risposta alle vibrazioni, risposta alle sollecitazioni termiche circadiane e stagionali), verificando che non siano superate fissate soglie di attenzione sia per valori istantanei (danneggiamento a seguito di cedimento) sia per trend (danneggiamento progressivo) del sistema di isolamento.

L'insieme delle tematiche affrontate dal progetto è sintetizzato in Figura 2.

Figura 1 mostra il "Sarcofago degli Sposi" conservato nel Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia all'interno di una teca in vetro. L'opera, realizzata in terracotta dipinta, raffigura una coppia di coniugi semidistesi uno accanto all'altro su un letto da banchetto ricoperto da cuscini. Entrambe le figure hanno occhi allungati e labbra aperte in un sorriso. La donna indossa abiti eleganti, tipiche calzature con la punta ripiegata verso l'alto ed un copricapo caratteristico dal quale escono lunghe trecce. L'uomo, a busto nudo, ha capelli lunghi e barba appuntita e cinge teneramente con il braccio destro le spalle di lei. La disposizione delle mani dei due sposi evoca la presenza di oggetti andati perduti quali una coppa per il vino o un vaso dal quale versare profumo o unguenti. Il sarcofago era destinato a contenere le

ceneri dei coniugi defunti.

Lo schema di Figura 2 evidenzia i principali obiettivi del progetto MONALISA e i risultati economici ed indiretti attesi più rilevanti. Nello schema, il progetto MONALISA è rappresentato dal cerchio posto nel centro al quale corrispondono dieci nodi: sei rappresentano gli obiettivi principali, due indicano i risultati economici e due i risultati indiretti.

Gli obiettivi principali del progetto consistono nella messa a punto di una procedura per la valutazione della vulnerabilità degli oggetti d'arte per vibrazioni da terremoti e da traffico, nella progettazione di un dispositivo base per l'isolamento dalle vibrazioni, nell'ottimizzazione del dispositivo di protezione degli oggetti d'arte, nell'integrazione della tecnologia di monitoraggio attivo in fibra ottica con il dispositivo di protezione e infine nell'applicazione del dispositivo ottimizzato al "Sarcofago degli Sposi".

I risultati economici più rilevanti consistono nel favorire l'occupazione con l'acquisizione di personale incrementale per lo svolgimento delle attività del progetto e nel posizionamento sul mercato della tecnologia innovativa per la protezione da vibrazioni di oggetti d'arte. Tra i risultati indiretti del progetto lo schema evidenzia la sinergia tra il mondo della ricerca e le realtà imprenditoriali legate all'innovazione tecnologica e le ricadute in ambito culturale.

*Per info: [aurora.vincenti@enea.it](mailto:aurora.vincenti@enea.it)*

1. Bollettino Ufficiale della Regione Lazio, n. 48, Supplemento n. 1, del 16.06.2016



# Il progetto H-S3D: elementi *intelligenti* in stampa 3D

Il progetto H-S3D vuole contribuire alla definizione di un processo progettuale e produttivo innovativo basato sull'uso di materiali ecosostenibili con elevate prestazioni meccaniche e termiche per realizzare componenti architettoniche modellate sulla irregolarità geometrica della lacuna, con caratteristiche strutturalmente ottimizzate che possano anche essere utilizzati per svolgere un monitoraggio permanente post intervento.

DOI 10.12910/EAI2022-030

di Michele Caponero, Laboratorio di Micro e Nanostrutture per la Fotonica - ENEA - Maura Imbimbo e Assunta Pelliccio, Università di Cassino e del Lazio meridionale, Alessandro Graziani e Sonia Marfia, Università degli studi di Roma TRE

**L**a stampa 3D rappresenta una tecnologia che nell'ultimo decennio ha mostrato una crescente diffusione in diversi ambiti applicativi. Uno di questi è certamente rappresentato dai beni culturali come illustrato nel recente lavoro [1]. L'utilizzo principale della stampa 3D nell'ambito dei beni culturali è nella riproduzione fisica di reperti archeologici e scultorei ai fini di studio, conservazione e disseminazione.

Un'ulteriore e più recente applicazione riguarda l'ambito del ripristino o del restauro integrativo, o almeno delle fasi preliminari ed intermedie del processo, dove è richiesta la riproduzione fisica di elementi decorativi e/o architettonici e quella di componenti per il riempimento di lacune o la ricostruzione di parti. Infatti, la tecnologia, così detta di *additive manufacturing* su cui la stampa 3D si basa, consente una libertà di riproduzione e progettazione delle forme e, allo stesso tempo, una precisione dei dettagli che la rendono molto più versatile rispetto

alle tecniche tradizionali; rispetto a queste ultime la tecnologia di *additive manufacturing* presenta l'ulteriore vantaggio di una riduzione dei costi e dei tempi grazie ad una *industrializzazione* dei processi attualmente di *tipo artigianale*.

L'utilizzo di stampati 3D in luogo di materiali tradizionali, continuando a preservare il principio della reversibilità e riconoscibilità dell'intervento, introduce una **maggiore sostenibilità ambientale** per la possibilità di **utilizzare materiali ecosostenibili, riutilizzare componenti realizzati, risparmiare materie prime**. Non ultimo, la possibilità di utilizzare **materiali più leggeri** e con un rapporto vantaggioso tra peso e prestazioni meccaniche, rendono la tecnologia uno strumento particolarmente idoneo nelle applicazioni in **campo sismico**.

A fronte di tali vantaggi, la tecnologia di *additive manufacturing* rimane ancora in una fase sperimentale sia sul piano tecnico-scientifico che su quello concettuale-applicativo sul quale ha ancora una implementazione limitata.

## Progettazione e modellazione con materiali innovativi ecosostenibili

Il progetto di ricerca H-S3D vuole fornire un contributo sul piano tecnico-scientifico definendo lo sviluppo di un processo progettuale e produttivo innovativo che, grazie all'uso di materiali ecosostenibili con elevate prestazioni meccaniche e termiche, realizzi componenti architettonici modellati sulla irregolarità geometrica della lacuna, con caratteristiche strutturalmente ottimizzate che possano anche essere strumentati per svolgere un **monitoraggio permanente post intervento**.

Tale processo viene validato dal punto di vista della sperimentazione, modellazione e realizzazione degli elementi a partire dal livello del materiale per arrivare a quello del prodotto finale con una particolare attenzione alle caratteristiche di sostenibilità del processo. L'attività del progetto consiste nella **progettazione e modellazione di elementi strutturali e compo-**



Fig. 1 Rappresentazione digitale della Rocca Janula, nello stato attuale con le lacune (sinistra, elaborazione di rilievo fotogrammetrico da drone) e nella possibile condizione post intervento di inserimento degli stampati 3d (destra, modello texturizzato)

**nenti architettonici con materiali innovativi ecosostenibili** dove la progettazione del materiale e del processo di stampa saranno centrali per la realizzazione delle prestazioni richieste. Nell'ambito del progetto viene analizzata sia da un punto di vista teorico che sperimentale anche la progettazione delle connessioni fra elementi stampati e costruzione esistente.

Un ulteriore aspetto caratterizzante il progetto consiste, infine, nella possibilità di rendere gli stampati 3D degli elementi *smart* utilizzandoli per un monitoraggio permanente del bene architettonico con **l'alloggiamento di sensori nel corpo dello stampato ed una opportuna progettazione del sistema di monitoraggio**.

La realizzazione dei provini e le prove sperimentali su di essi, vengono progettate via via in sinergia con le fasi di rilievo e rappresentazione digitale del bene e delle sue lacune, di progettazione del materiale e degli elementi strutturali, e della progettazione del sistema di monitoraggio. La realizzazione degli elementi da installare nelle lacune del bene architettonico, nonché delle connessioni di tali elementi con la struttura esistente, rappresenta il prodotto fi-

nale del progetto insieme al processo di monitoraggio da attivare nella fase post-intervento.

Il progetto analizza due tipologie di applicazioni: la ricostruzione parziale di elementi in muratura e/o il riempimento di lacune in modo da restituire la fruibilità completa o parziale di una costruzione antica; la ricostruzione di elementi decorativi, quali ad esempio i cornicioni o le cornici di palazzi storici o le merlature di altre opere architettoniche, una delle situazioni di degrado più diffuse e comuni del patrimonio costruttivo italiano. Nell'ambito della prima tipologia di applicazioni, il caso di studio scelto per lo sviluppo delle attività è la Rocca Janula, sita nel comune di Cassino (FR), uno dei più significativi monumenti per la comunità locale e della Terra di San Benedetto sin dal X secolo.

Il progetto H-S3D è attualmente in corso. Le attività fino ad oggi sviluppate hanno riguardato essenzialmente tre aspetti: i) fase di conoscenza, rilievo e rappresentazione digitale della Rocca Janula con l'individuazione delle lacune e delle componenti del bene su cui intervenire; ii) modellazione numerica di

elementi ottenuti mediante la stampa 3D tenendo conto della struttura del materiale alle differenti scale di osservazione e di differenti parametri di stampa; iii) progettazione geometrico/dimensionale basata sullo sviluppo di processi di ottimizzazione avanzati basati sugli algoritmi genetici che, nella progettazione della fase di stampa 3D, consentano di ottimizzare il processo di realizzazione dell'opera. La Figura 1 mostra la rappresentazione digitale della Rocca Janula, nello stato attuale con le lacune (sinistra, elaborazione di rilievo fotogrammetrico da drone) e nella possibile condizione post intervento di inserimento degli stampati 3D (destra, modello texturizzato).

Il progetto H-S3D è realizzato da due Dipartimenti e tre Laboratori del Centro di Eccellenza DTC - Lazio. L'Università di Cassino e Lazio Meridionale partecipa con il Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica ed il Laboratorio di Analisi e Progettazione Strutturale, in particolare per progettazione strutturale e modellazione digitale. L'Università di Roma Tre partecipa con il Dipartimento di Ingegneria, in particolare per la sperimentazione e la modella-

zione. L'ENEA partecipa con il Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica, in particolare per lo sviluppo di un sistema di monitoraggio integrato ai componenti 3D. Partecipa attivamente al progetto l'impresa del Lazio società ARAKNIA LABS s.r.l., con competenze specialistiche per lo sviluppo del processo produttivo e la realizzazione degli oggetti in stampa 3D. Partecipa al progetto il Comune di Cassino come titolare del bene architettonico sul quale verrà sviluppato il progetto. Inoltre

sono partner del progetto: Faculty of Architecture della Silesian University of Technology (Polonia); il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Architettura dell'Università degli Studi di Pavia con il centro 3D@UniPV; la società consortile Parco Scientifico e Tecnologico del Lazio Meridionale. Nell'ambito del progetto H-S3D si prevedono interazioni con il progetto 3DH-solutions, finanziato dalla Regione Lazio nell'ambito del Bando Pubblico "Progetti di Gruppi di Ricerca 2020", relativo alla stessa

macro-tematica al fine di migliorare l'efficacia dei risultati.

**Ringraziamenti.** Il progetto H-S3D è stato finanziato dalla Regione Lazio nell'ambito del Bando Pubblico "DTC TE1 - Fase II - Progetti RSI", Det. G07413 del 16.06.2021, pubblicata sul BURL n. 61 del 22.06.2021, Avviso pubblico di LAZIO INNOVA.

*Per info: michele.caponero@enea.it*

#### BIBLIOGRAFIA

1. L. Acke, K. De Vis, S. Verwulgen, J. Verlinden, (2021), "Survey and literature study to provide insights on the application of 3D technologies in objects conservation and restoration", Journal of Cultural Heritage, Volume 49, May-June 2021, Pages 272-288, Elsevier

# Le sorgenti laser al servizio dei beni culturali

L'ENEA sviluppa e applica tecnologie innovative per il monitoraggio, la fruizione e l'accesso virtuale ai Beni Culturali, basate principalmente sull'utilizzo di sorgenti laser. Ne sono l'esempio i progetti VADUS -Virtual Access and Digitalization for Unreachable Sites- e COLLINE per lo Sviluppo e l'applicazione in situ di tecnologie innovative per la CONservazione di Lapidei mediante oLI essenziali e Nanotecnologie e sistemi integrati per la digitalizzazione e il monitoraggio dei manufatti su monumenti medievali.

DOI 10.12910/EAI2022-031

di Valeria Spizzichino, *Laboratorio di Diagnostica e Metrologia - ENEA*

**D**a anni il Laboratorio di Diagnostica e Metrologia (DIM) si occupa dello sviluppo ed applicazione di tecnologie innovative principalmente basate sull'utilizzo di sorgenti laser per la caratterizzazione chimica e morfologica di superfici. La possibilità di lavorare a distanza, fino anche ad alcune decine di metri, in modo non invasivo, senza la necessità di campionamento, tramite anche il solo accesso ottico, rende tali tecnologie particolarmente indicate per applicazioni in ambienti ostili e su superfici delicate.

Da quanto detto si può facilmente capire come uno dei campi di applicazione naturali sia quello dei Beni Culturali. Ma non l'unico: tecnologie nate per la caratterizzazione e lo studio di opere d'arte e reperti storici possono essere usate in ambito nucleare, forense, security (solo per citarne alcuni) e viceversa. Ovviamente, questo scambio tra differenti settori di ricerca, ma anche economici, non si limita a questo livello, ma si amplia all'ingegnerizzazione di nuovi materiali, a competenza ICT, allo sviluppo di infrastrutture ed alla creazione di piattaforme tecnico-scientifi-

che che possono avere ricadute a livello sociale ed economico, ricadute che possono essere molto maggiori di quanto si possa pensare ad una prima analisi.

I progetti VADUS (Virtual Access and Digitalization for Unreachable Sites) e COLLINE (Sviluppo e applicazione in situ di tecnologie innovative per la CONservazione di Lapidei mediante oLI essenziali e Nanotecnologie e sistemi integrati per la digitalizzazione e il monitoraggio dei manufatti su monumenti medievali) incarnano, anche se in framework differenti, esattamente questa filosofia di interscambio tra settori differenti per la amplificazione delle ricadute economico-sociali di tecnologie e metodi innovativi.

## Il progetto VADUS e l'Agencia Spaziale Europea

Il primo è un progetto finanziato dall'Agencia Spaziale Europea (ESA) ed è stato sviluppato in risposta alla call ARTES 20 IAP di ESA ITT AO/1-10065/19/NL/AF "Applications integrating space asset(s) and 5G networks in L'Aquila /the Abruzzo region, Roma Capitale and Municipality of Torino

(L'ART)" con focus Cultural Heritage: Fruition & Diffusion e ha come obiettivo quello di proporre nuove soluzioni e paradigmi per un'esperienza completamente immersiva con contenuti arricchiti tramite l'utilizzo di dispositivi di uso comune come smartphone e tablet, senza alcun vincolo in termini di percorso di visita ed unità di elaborazione grafica, rivelando allo spettatore anche aspetti nascosti delle opere d'arte grazie all'utilizzo dei risultati provenienti da tecnologie diagnostiche strumentali.

In particolare, la convergenza tra realtà virtuale, 5G, servizi satellitari e infrastrutture cloud permette, nell'ambito del progetto, un accesso rapido a contenuti arricchiti, senza i limiti di calcolo e di banda dei dispositivi indossabili attualmente utilizzati per le visite virtuali.

Tali tecnologie, insieme a quelle sfruttate per creare i contenuti, tra cui *in primis* le tecnologie di diagnostica laser dell'ENEA, forniranno, alla conclusione di VADUS, dei prodotti di facile accesso, ma di valore elevato, indirizzati sia al pubblico generico che agli addetti ai lavori nel settore dello studio e della



Fig. 1 Il sistema LIF Forlab durante la campagna di misure VADUS presso il Parco Archeologico di Ostia Antica. Anno 2021 - Fonte: ENEA

conservazione dei beni storico-artistici. In questo senso, quindi, l'attività del progetto VADUS si inserisce sia nel processo che vede il passaggio dall'Internet of Things (IoT, la rete di dispositivi) all'Internet of Knowledge (IoK, la rete delle conoscenze) che nella filosofia della Economia della Conoscenza (la cosiddetta Knowledge Economy), in cui si riconosce il ruolo della creazione, diffusione, trasformazione, trasferimento ed utilizzo della conoscenza in ogni sua forma per generare valore e fonti di guadagno.

### Il progetto COLLINE

Ed è proprio in questo contesto che la seconda fase dell'Avviso pubblico ricerca e sviluppo di tecnologie per la valorizzazione del patrimonio culturale

del DTC – Distretto Tecnologico per le nuove tecnologie applicate ai Beni ed alle Attività Culturali della Regione Lazio, con il quale è stato finanziato il progetto COLLINE, va a collocarsi. L'Avviso pubblico ha, infatti, mirato a sostenere la diffusione di tecnologie innovative per la valorizzazione, conservazione, recupero, fruizione e sostenibilità del patrimonio culturale del Lazio. Con il chiaro scopo di alimentare il trasferimento tecnologico verso le piccole e medie imprese della Regione, che ne beneficeranno anche in futuro e anche in altri settori.

COLLINE conta di fare la sua parte in questo panorama. Infatti, il progetto nasce dalla collaborazione tra la ricerca pubblica (ENEA, che è anche capofila, Università della Tuscia e Università di Roma La Sapienza) e due ditte

con sede nel Lazio, ma attive a livello nazionale ed internazionale, De Feo Restauri e Eagleprojects SpA. L'obiettivo generale di COLLINE è di mettere a punto, testare e valutare in condizioni reali e su monumenti in corso di restauro, un protocollo di recupero di superfici degradate grazie all'uso sinergico di materiali innovativi per il restauro conservativo, di moderne ed innovative tecniche diagnostiche e di sensoristica e dell'informatizzazione di dati, aggiornati in tempo reale, per monitoraggio e gestione in remoto. I materiali protettivi utilizzati devono permettere non solo un recupero immediato del bene, ma anche una sua duratura protezione da agenti esterni, quali umidità ed attacchi biologici. Per ottenere questo sono utilizzati sia materiali biocompatibili e green che nanomateriali.

La sperimentazione e l'applicazione di tecniche innovative integrate, finalizzate ad una informatizzazione degli interventi e degli esiti delle indagini che avranno interessato i diversi beni, hanno il duplice obiettivo di renderli fruibili su larga scala, bypassando quindi i limiti fisici e geografici, e gestibili e monitorabili da remoto, garantendo, in questo modo, una notevole semplificazione dei processi di manutenzione ed una conseguente minimizzazione dei costi ad essi annessi. In particolare, l'allestimento di una piattaforma Web-GIS in cui ospitare e visualizzare i modelli 3D dei siti, i dati di rilievo acquisiti, rendere disponibili e mantenere aggiornati i dati raccolti dai sensori installati e notificare in real-time stati di alert non solo agevola e supporta tutte le attività del progetto, ma garantirà l'accesso anche futuro a tutto il materiale raccolto e prodotto, proponendo un *modus operandi* completamente nuovo nel campo della gestione e fruizione dei Beni Artistici. È da sottolineare che nanotecnologie, gestione remota dei dati, geolocalizzazione e possibilità di fruizione in remoto sono fra le tecnologie abilitanti elencate dalla Comunità Europea e dal Piano Nazionale Impresa 4.0 e sono impiegate in COLLINE per

sviluppare soluzioni e miglioramenti tecnologici attraverso esperienze di ricerca capaci di rivitalizzare il mondo del restauro dei Beni Culturali.

Più in dettaglio, la leadership nazionale di ENEA nello sviluppo sostenibile e nel campo delle nuove tecnologie emerge dalle attività svolte nei progetti illustrati. Infatti, in VADUS, i ricercatori del Laboratorio Diagnostica e Metrologia (DIM) utilizzano tre dei prototipi sviluppati nel Laboratorio stesso: il sistema imaging a scansione LIF (Fluorescenza Indotta da Laser) chiamato Forlab e il sistema IR-ITR (Infra Red Imaging Topological Radar) per misure di spettroscopia, in grado di evidenziare caratteristiche non visibili ad occhio nudo, come restauri, ripensamenti, danni, e il sistema RGB-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar) per la costruzione di modelli 3D ad alta risoluzione con colori nativi.

#### Beni storico-artistici non accessibili

I risultati di tali tecniche, ossia immagini di fluorescenza, immagini nell'infrarosso e modelli, costituiscono dei livelli informativi da inserire all'interno del modello 3D fotogrammetrico pro-

dotto, per ciascuno dei siti prescelti, da CITERA (Centro di Ricerca interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente) dell'Università di Roma La Sapienza. Il prodotto finale permetterà una visita virtuale grazie alle infrastrutture di TIM e all'applicazione sviluppata da NEXT SpA, capofila e coordinatore tecnico del progetto. I siti prescelti per le dimostrazioni sono di tutto rispetto e rappresentano degli incredibili esempi di beni storico-artistici non accessibili: la Casa di Diana nel Parco archeologico di Ostia Antica, l'Aula Isiaca nel Parco archeologico del Colosseo e, per il Comune di Torino, Museo Pietro Micca e Forte Pastiss.

I test e le attività di COLLINE sono, invece, concentrate nella città di Viterbo, per la ricchezza di costruzioni medievali di grande valore storico, ma di difficile conservazione.

L'ENEA svolge, all'interno del progetto, differenti ruoli. Il primo è quello di coordinatore. Il secondo, grazie alle competenze sviluppate nel Laboratorio di Micro e Nanostrutture per la Fotonica (MNF), è legato all'ideazione e produzione di un materiale protettivo e consolidante nanostrutturato innovativo, mai testato prima. Inoltre, ENEA si occuperà sia della diagnostica che del monitoraggio: i prototipi LIF del Laboratorio DIM saranno impiegati per valutare lo stato di salute del sito ed effetti e durabilità dei trattamenti fatti, "fotografando" le condizioni iniziali del bene ed il suo stato ad intervalli regolari dopo le applicazioni.

Il Laboratorio MNF sovrintenderà, invece, alle attività relative all'utilizzo di sensori in fibra ottica di tipo FBG (a reticolo di Bragg), funzionalizzate e non, per la valutazione e il controllo delle condizioni ambientali e microclimatiche a cui il bene è sottoposto. Con la novità, rispetto alla letteratura di settore, che tali sensori saranno impiegati per misure di umidità, oltre che per misure di temperatura e di parametri strutturali.

Per info: [valeria.spizzichino@enea.it](mailto:valeria.spizzichino@enea.it)



# Le radiazioni ionizzanti in ‘soccorso’ dei beni culturali

Tra i fattori che causano danni spesso irreversibili ai beni culturali vi sono gli organismi biodeteriogeni quali insetti, muffe e funghi. Un metodo molto efficace, non distruttivo e non invasivo per rimuoverli, è l'impiego delle radiazioni ionizzanti presso la facility di irraggiamento Calliope e l'impianto REX dell'ENEA. In molti Paesi la crescente collaborazione tra facility di irraggiamento, laboratori di ricerca ed istituzioni culturali, archivi, musei e biblioteche ha aperto nuove prospettive per l'utilizzo di queste tecnologie anche se esiste tuttora una forte resistenza al loro utilizzo da parte di molti operatori del settore.

DOI 10.12910/EAI2022-032

di Alessia Cemmi, Ilaria Di Sarcina, Beatrice D'Orsi, Carino Ferrante, Maria Oliviero, Jessica Scifo, Adriano Verna, *Laboratorio Sistemi Nucleari Innovativi - ENEA* e Monia Vadrucchi, *Laboratorio sviluppo di Acceleratori di Particelle per Applicazioni Medicali - ENEA*

**Q**uando si trattano argomenti e problematiche legate al trattamento di manufatti di interesse nel campo dei beni culturali, si assiste da anni ad una forte contrapposizione tra le spinte più innovative e l'aspetto più conservatore, ancora saldamente legato alle metodologie ed alle tecniche di restauro tradizionali impiegate da decenni. Molto frequentemente però queste ultime non si dimostrano efficaci nell'eliminazione del fattore responsabile del processo di degrado che il manufatto subisce. Nel caso della presenza di microorganismi o insetti, il biodegrado può facilmente e rapidamente portare al completo deterioramento dei materiali costitutivi dell'oggetto di interesse, con conseguente perdita irreversibile dello stesso. **Un metodo estremamente adatto ed efficace per la rimozione degli organismi biodeteriogeni, in quanto non distruttivo e non invasivo, vede l'impiego delle radiazioni ionizzanti presso le facility di irraggiamento Calliope e REX dei Laboratori ENEA.**

## Metodi tradizionali ed innovativi per il recupero e la conservazione dei beni culturali

La salvaguardia dei beni culturali è un aspetto centrale per la valorizzazione dell'identità storica, artistica e nazionale dei singoli Paesi e per lo studio delle influenze e scambi avvenuti tra le diverse civiltà nel corso della storia. Purtroppo però i segni del tempo, gli eventi naturali (terremoti, alluvioni) e quelli di origine antropica (conflitti, inquinamento) possono rappresentare una seria minaccia per la conservazione del patrimonio artistico-culturale, portando come ultima conseguenza alla perdita irrecuperabile di manufatti di diversa tipologia, monumenti ed opere d'arte di inestimabile valore.

Tra i fattori di degrado più comuni, oltre alle non corrette condizioni di conservazione (presenza di umidità, temperature ed illuminazione non idonee), possono essere considerati gli organismi biodeteriogeni quali

**insetti, muffe e funghi, che causano danni spesso irreversibili ai beni di interesse.** In particolare, alcuni microrganismi, specialmente in specifici stadi del loro sviluppo (ad esempio le spore fungine), presentano caratteristiche di tossicità per l'uomo e rendono estremamente limitata se non del tutto interdotta la fruibilità del bene contaminato. Non va inoltre sottovalutato il fatto che lo sviluppo dei biodeteriogeni spesso avviene in tempi molto brevi, producendo ingenti danni estesi ad intere collezioni o biblioteche. Grandi sforzi sono quindi condotti dai restauratori, curatori ed operatori nel campo dei beni culturali per rallentare o eliminare le cause di deterioramento.

**I metodi di trattamento più tradizionali non si dimostrano però sempre efficaci e non sono sempre sostenibili, in quanto prevedono solitamente tempistiche di intervento piuttosto lunghe e l'impiego di sostanze chimiche poco green e dannose per la salute.** Per questi motivi, gli operato-



Progetto Pergamo: l'attività sperimentale prevede trattamenti di recupero dal biodegrado - Fonte: ENEA

**ri si stanno sempre più rivolgendo al mondo della ricerca per lo sviluppo di tecniche innovative, quanto più non distruttive e non invasive possibile, per il restauro e la conservazione del patrimonio culturale.**

Forse insospettabilmente per molti, i trattamenti che prevedono l'utilizzo di radiazioni ionizzanti (fotoni, elettroni e raggi X), tipicamente utilizzate in altri settori, possono essere molto efficaci per la rimozione dei biodeteriogeni e quindi per la disinfezione e disinfestazione di beni di interesse storico e culturale delle più diverse tipologie (documenti, libri, manoscritti, pergamene, cuoio, tessuti, opere lignee e pittoriche, manufatti etnografici, ecc.).

**Negli ultimi anni, in numerosi Paesi la crescente collaborazione in questo ambito tra facility di irraggiamento, laboratori di ricerca ed istituzioni culturali, archivi, musei e biblioteche ha aperto nuove prospettive per l'utilizzo di queste tecnologie come valide alternative a quelle tradizionali.**

Le tecniche di irraggiamento vengo-

no largamente utilizzate già in molti Paesi, primi fra tutti la Francia [1] e il Brasile [2], dove interi impianti di trattamento con radiazioni ionizzanti sono destinati quasi esclusivamente ad attività di recupero di beni culturali. La diffusione di questi processi è legata al fatto che l'utilizzo delle radiazioni ionizzanti presenta numerosi ed indiscutibili vantaggi rispetto alle procedure di conservazione tradizionali, quali ad esempio la capacità di eliminare indiscriminatamente e simultaneamente qualsiasi specie di organismo biodeteriogeno (a causa dei danni indotti dalle radiazioni a livello del DNA) e l'assenza di rilascio di residui tossici o radioattivi nel manufatto irraggiato a seguito del trattamento. Inoltre, se consideriamo le radiazioni gamma ed i raggi X, grazie al loro alto potere di penetrazione nei diversi materiali, essi rappresentano senza dubbio il metodo più affidabile ed efficace in caso di manufatti complessi (per composizione o forma), difficilmente trattabili con tecniche convenzionali e forse l'unica pos-

sibilità in caso di calamità naturali (inondazioni e terremoti), quando si presenta la necessità di intervenire su ingenti quantità di materiale nel più breve tempo possibile. I processi con elettroni sono invece particolarmente indicati per trattamenti rapidi di cura dei beni affetti da biodegrado negli strati superficiali.

**Esiste tuttavia ancora una forte resistenza in diversi Paesi, tra cui l'Italia, all'introduzione di tali tecniche da parte di numerosi operatori del settore.** La ragione di questa diffidenza è spesso dovuta all'errata conoscenza di ciò che succede effettivamente al materiale trattato ovvero delle modifiche chimico-fisiche o side-effects (cambiamenti di colore, infragilimento) indotte dalle radiazioni ionizzanti sui manufatti. È necessario ricordare però che qualsiasi trattamento (anche quelli tradizionali) induce modifiche di varia natura negli oggetti trattati, rendendo necessaria anche in questo caso una seria valutazione della reale esigenza di eseguire un trattamento o meno.

Nonostante le tecnologie di irraggiamento siano già impiegate, per assicurare siano già impiegate, per assicurare la minimizzazione delle modifiche radio indotte nei manufatti è essenziale individuare correttamente le **condizioni di irraggiamento ottimali** (in termini di dose assorbita, intensità di dose, atmosfera, temperatura) che variano a seconda del materiale di interesse.

Non ultimo, è **necessaria la definizione di vere e proprie linee guida e protocolli condivisi a livello internazionale tra gli operatori del settore.** Proprio questi aspetti sono stati, negli ultimi anni, al centro delle attività di ricerca condotte presso i Laboratori delle facility di irraggiamento Calliope (radiazioni gamma) e REX (elettroni e raggi X) dell'ENEA [5-9]. I ricercatori della facility Calliope da anni collaborano, in qualità di esperti riconosciuti a livello internazionale, con numerosi istituti di ricerca di vari Paesi nell'ambito di progetti che riguardano il trattamento con radiazioni ionizzanti



di Beni Culturali indetti dalla IAEA (International Atomic Energy Agency), agenzia dell'ONU che si occupa dell'uso pacifico delle radiazioni in numerosi settori. L'impianto REX e la sua configurazione dedicata alle attività di rimozione del biodegrado dei beni artistici, sono stati invece messi a punto con i progetti di ricerca «dimostratori» delle tecnologie nucleari applicate alla scienza e conservazione dei beni culturali promosse e finanziate nell'ambito delle attività del Distretto Tecnologico per i Beni e le Attività Culturali (DTC) della Regione Lazio.

### Il progetto PERGAMO

La lotta al biodegrado del patrimonio artistico e culturale è al centro delle attività previste dal progetto PERGAMO (recupero dal biodegrado con metodologie fisiche e caratterizzazione del patrimonio storico e archivistico), coordinato da ENEA e che vede coinvolte le facility di irraggiamento Calliope del Centro ENEA Casaccia e REX del Centro ENEA Frascati. Il progetto, della durata di 18 mesi e che ha preso il via all'inizio del 2022, ha ricevuto un finanziamento dal DTC della Regione Lazio. Le tecniche di trattamento e di caratterizzazione proposte per analisi

in situ ed ex situ, hanno rappresentato la carta vincente per il team di ricercatori ENEA che, insieme agli altri partner del progetto (Università di Roma La Sapienza, Università di Cassino e del Lazio Meridionale e ASSING S.p.A.) e con il supporto di 10 stakeholder (Istituti Centrali, Poli Museali, Parchi Archeologici, Istituzioni di Ricerca nazionali ed internazionali, ed un'Associazione di categoria), applicheranno, per la prima volta in Italia, tali tecnologie al patrimonio artistico-culturale.

**Il Progetto PERGAMO nasce quindi per rispondere a specifiche priorità ed esigenze degli stakeholder e degli operatori impegnati nell'ambito degli interventi di conservazione e restauro dei beni culturali e ha come scopo, tra l'altro, la messa a punto e la definizione di linee guida e protocolli innovativi da mettere a disposizione di istituti pubblici e utenti privati per il trattamento, la cura ed il recupero dei manufatti di interesse storico e artistico.**

Le valutazioni di tipo bio-chimico, fisico e morfologico necessarie per lo studio dello stato dell'arte del bene, dell'ottimizzazione delle condizioni di irraggiamento, dell'efficacia degli interventi e della stabilità dei materiali stessi nel tempo verranno effettuate

mediante tecniche avanzate di misura e di analisi che saranno confrontate e combinate fra loro. Questo permetterà di proporre tecniche diagnostiche, strumentazione e processi di trattamento di facile fruizione da parte degli organi di cultura, degli operatori e delle imprese del Lazio. A tale scopo, una delle finalità del progetto PERGAMO è proprio quella di condurre attività di diffusione, promozione e divulgazione dei risultati ottenuti oltre alla formazione di giovani ed esperti nell'ambito della diagnostica, della conservazione e del trattamento per il recupero dei Beni Culturali. L'attività sperimentale di PERGAMO prevede trattamenti di recupero dal biodegrado e caratterizzazioni bio-chimico-fisiche pre- e post-irraggiamento su tipologie differenti di materiali e manufatti quali, ad esempio, materiale archivistico-librario (composto principalmente da materiali a base di cellulosa o pergamena), manufatti lignei, lapidei o compositi (carta, legno, cuoio, colle, pigmenti, metalli, pietre dure, matrici vetrose, madreperla) provenienti da diversi luoghi e forniti dai numerosi stakeholder coinvolti.

*Per info: [alessia.cemmi@enea.it](mailto:alessia.cemmi@enea.it)*

### BIBLIOGRAFIA

1. <https://www.youtube.com/user/ARCNUcleart>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=wvid7KvPPjE>
3. Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research, IAEA Radiation Technology Series 2 (2011).
4. Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA Radiation Technology Series 9 (2017).
5. S. Baccaro, A. Cemmi, Nukleonika 62 (2017) pp.261-267, DOI: 10.1515/nuka-2017-0038.
6. M. Vadrucci, et al., Frontiers in Materials 7 (2020), 21.
7. A. Cemmi, I. Di Sarcina, G. Ferrara, ENEA Technical Report RT/2020/1/ENEA.
8. M. Vadrucci, et al., Applied Surface Science 513 (2020), 145881.
9. M. Vadrucci, et al., The European Physical Journal Plus 136 (2021), 873.

# Il contrasto al deterioramento causato dall'umidità

*Sfide sempre più impegnative si presentano sul versante della conservazione dei beni culturali: al normale deterioramento causato dal passare del tempo, si sommano gli effetti della pressione antropica sul paesaggio, che aggravati dai cambiamenti climatici in corso, espongono molti siti di interesse ai danni dovuti alle infiltrazioni di umidità. La ricerca risponde a queste nuove sfide con l'approccio multidisciplinare e lo sviluppo ed applicazione di tecnologie che godono ampio consenso nella comunità scientifica.*

DOI 10.12910/EAI2022-033

di Francesco Colao, Laboratorio Diagnostiche e Metrologia - ENEA

**L**a tutela dei beni culturali è un elemento essenziale del rapporto che la nostra società ha con i resti del passato ed insieme alla gestione e valorizzazione delle opere d'arte è momento centrale del processo che favorisce e potenzia la protezione, conservazione e fruizione del patrimonio culturale [1]. In questo ambito non si può non considerare il ruolo svolto dalla ricerca, riconosciuta anche dal Legislatore già nel Codice dei beni culturali e del paesaggio, dove meglio ne chiarisce il rapporto con la tutela, definendo quest'ultima *come consistente nell'esercizio delle funzioni e nella disciplina delle attività dirette, sulla base di un'adeguata attività conoscitiva, ad individuare i beni costituenti il patrimonio culturale ed a garantirne la protezione e la conservazione per fini di pubblica fruizione* (art. 3 comma 1 Dlg.s 42/2004).

Il ruolo svolto dalla ricerca nell'ambito delle attività conoscitive è molteplice: se in campo umanistico riguarda l'approfondimento del contesto storico-ambientale, in quello tecnico-scientifico studia le metodologie

costruttive, come anche i materiali utilizzati e il loro interagire con l'ambiente, e fornisce informazioni per la conservazione ed il restauro conservativo ottimale. **Solo il rigoroso approccio scientifico, garantisce il rispetto dell'opera d'arte e, attraverso la definizione delle strategie ottimali di gestione, diventa il moltiplicatore di un'ampia e corretta fruizione dello stesso.**

## I progetti REMEDIA e CIACCO

La Regione Lazio ha raccolto le istanze di tutela conservazione, valorizzazione e fruizione dei beni culturali attraverso la disposizione di bandi nel Programma Operativo Regionale-Fondo Europeo per lo Sviluppo Regionale (POR FESR) Lazio 2014-2020 e nell'Accordo di programma quadro "Ricerca, Innovazione Tecnologica, Reti Telematiche" (APQ6), al quale l'ENEA, da sempre impegnata nello sviluppo e promozione delle tecnologie e del loro trasferimento al sistema Paese, ha risposto con successo insieme ai partner CNR (con gli istituti INM-Istituto di Ingegneria del Mare,

ISPC - Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale), Università di Roma Tor Vergata (Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ingegneria Informatica, ed il Dipartimento di Biologia) e un operatore privato, ottenendo il finanziamento per il **progetto REMEDIA** (RicErca, diagnostica e METodi di contrasto al Deterioramento causato dall'umidità nei Beni Culturali) [2] ed per il **progetto CIACCO** (Sviluppo e applicazione in situ di tecnologie innovative per il Contrasto alle Infiltrazioni d'Acqua in nelle Chiese romane del Centro storico) [3].

**Questi progetti rispondono alla ampia e variegata richiesta che emerge dalle problematiche di conservazione e restauro del patrimonio culturale di cui l'Italia è ricchissima. Nuove sfide si presentano infatti sul versante della diagnostica: al normale deterioramento causato dal passare del tempo, si sommano oggi gli effetti della pressione antropica sul paesaggio, che aggravati dai fenomeni meteo estremi che caratterizzano i cambiamenti climatici in corso fanno sì che molti siti di interesse per i beni culturali soffrano**



di infiltrazioni di umidità. Ne sono un esempio i resti monumentali e le Chiese costruite su fondamenta romane, le Catacombe o i manufatti sepolcrali, soprattutto quelli ipogei, ovvero posti al di sotto del piano di campagna, in prossimità di corsi d'acqua o in zone umide. L'umidità di risalita è infatti una causa ricorrente del danneggiamento conseguente allo scambio acqua/aria nei materiali porosi. L'alternanza di stagioni secche prolungate e di forti piogge, influisce drammaticamente sulla distribuzione dell'umidità di risalita delle murature, sul microclima degli ambienti interni, nonché sul contenuto d'acqua. La presenza inoltre di finiture non traspiranti sovrapposte a materiali porosi amplificano gli effetti dannosi dei cicli assorbimento di acqua e della successiva evaporazione. Il problema dell'accertamento dello stato corrente e del contrasto al deterioramento dovuto all'umidità, è dunque di notevole importanza e richiede:

- la quantificazione dell'estensione e della distribuzione dell'umidità nelle murature e nel terreno al di sotto delle fondazioni della struttura, la sua diffusione, e gli scambi verso gli ambienti interni degli

edifici;

- la rivelazione delle alterazioni strutturali;
- la rivelazione delle alterazioni sulle superfici dipinte/decorate e delle efflorescenze saline;
- la rivelazione di microorganismi causa di biodeterioramento.

Lo scenario descritto rende conto della notevole importanza assunta dalla misura della distribuzione dell'acqua presente nei manufatti di interesse culturale; inoltre la tutela del bene culturale considerato come un *unicum*, oltre ad un'approfondita conoscenza degli effetti causati dal degrado richiede un'ottimale pianificazione di azioni di contrasto e mitigazione del danno.

#### Le metodiche sperimentali

La soluzione proposta nei progetti REMEDIA e CIACCO, si avvale dell'uso concorrente e sinergico di diverse metodiche sperimentali. Per i fini diagnostici sono state scelte tecnologie di elezione che godono di largo consenso nella comunità scientifica e si distinguono per la loro elevata specificità e per

non essere invasive; queste sono la termografia a infrarossi (IRT-Infrared Thermography), e la risonanza magnetica nucleare unilaterale (NMR-Nuclear Magnetic Resonance). Informazioni aggiuntive sugli effetti causati dall'acqua presente nei manufatti murari, funzionali alla costruzione di una panoramica completa del deterioramento dovuto alle infiltrazioni sono poi l'imaging acustico risolto in frequenza (FRAI-Frequency Resolved Acoustic Imaging), e l'imaging iperspettrale della fluorescenza indotta da laser (LIF-Laser Induced Fluorescence).

Nella IRT, il contenuto di umidità è correlato alle variazioni della temperatura superficiale; in modo semplificato, possiamo osservare che le zone umide sono contraddistinte da una minore temperatura a causa della natura endotermica dell'evaporazione. La IRT è una tecnica senza contatto e non distruttiva che può essere utilizzata per la diagnostica speditiva di grandi superfici, consentendo misurazioni ripetute nel tempo, e monitorare i fenomeni di risalita dell'acqua dal suolo dovuta al movimento capillare di acqua nei materiali porosi.

La RMN unilaterale fornisce la misu-

ra di acqua entro il primo centimetro di muratura; è non invasiva e non distruttiva e accuratamente calibrata, fornisce la valutazione quantitativa del contenuto di acqua. Va tuttavia considerato come la RMN sia una tecnica puntuale e che la sua effettuazione su ampie porzioni di manufatti murari richiede tempo; risulta dunque necessario limitare il suo uso ad aree di piccola estensione. La FRAI è basata sulla misura delle variazioni delle proprietà elastiche dei materiali costituenti e della struttura muraria, e valuta in modo non invasivo il danno strutturale di diversi tipi di strutture multistrato. Recentemente la FRAI ha trovato applicazione per valutare i cicli di assorbimento ed evaporazione dell'acqua, nonché per monitorare gli effetti dell'umidità nelle murature antiche.

**Infine la spettroscopia di fluorescenza indotta da laser (LIF) che è elettiva-**

**mente utilizzata per la rivelazione di sostanze che posseggono un'emissione fluorescente.** La LIF si basa sulla misura delle caratteristiche spettrali e temporali dell'autofluorescenza indotta da laser e consente la identificazione dei materiali superficiali. La sperimentazione effettuata in laboratorio mostra che il tenore di acqua nei substrati indagati non altera significativamente lo spettro di emissione di manufatti murari, tuttavia si è trovata una stretta correlazione tra lo spettro LIF e alterazioni spettroscopiche delle emissioni fluorescenti dovuti agli effetti a lungo termine dell'umidità [6] quali ad esempio la depigmentazione, le efflorescenze saline, l'attacco e la colonizzazione biologica.

#### I potenziali di innovazione

**Entrando nel vivo delle attività previste, riportiamo che il progetto RE-**

**MEDIA mira ad avanzare il grado di maturità tecnologica (TRL – Technology Readiness Level) [4] del prototipo di laboratorio denominato ACEADD (ACoustic Energy Absorption Diagnostic Device) basato sulla FRAI, alla integrazione strumentale e alla validazione basata su solidi principi metrologici.**

Nel progetto si intende passare dal prototipo di laboratorio sperimentato in ambienti di rilevanza specifici (TRL pari a 6), al dispositivo ACEADD da usare in ambienti operativi (TRL pari a 7); questo ha dimostrato la potenzialità di mappare il danno strutturale di diverse tipologie di strutture murarie multistrato in maniera non invasiva e senza contatto [5]. Il campo di impiego di ACEADD promette di essere notevolmente esteso potendo essere impiegato con successo a tutti i casi dove i danni strutturali sono ascrivibili ai



**Fig. 1** Misure di laboratorio vengono effettuate per studiare le riposte standard delle murature imbevite, nella figura si notano i trasduttori di emissione e ricezione del dispositivo ACEADD.

cicli di assorbimento ed evaporazione di acqua, quali ad esempio le pareti affrescate, le ceramiche artistiche, i dipinti su tavola e le pareti in muratura di edifici storici. **A completare il quadro diagnostico offerto dal progetto REMEDIA c'è lo studio della integrazione delle immagini acustiche con i dati delle altre tecniche coinvolte (IRT, NMR e LIF).** La fase finale di validazione in campo è prevista presso le Catacombe di Priscilla dove testare la strumentazione in ambiente ipogeo ed in condizioni reali. Azioni mirate di disseminazione supporteranno il trasferimento di conoscenza verso gli End User, potenziando l'offerta e le capacità tecnologiche delle imprese di settore.

**Il progetto CIACCO, completa la spirale evolutiva virtuosa che dalla indagine conoscitiva basata sulla innovazione tecnologica ottenuta in REMEDIA porta alla definizione di *best practice* di tutela e conservazione.** Gli obiettivi di CIACCO sono di maggiore respiro e ampiezza, poiché al momento diagnostico si aggiunge lo studio degli aspetti di stabilità statica, l'uso e il miglioramento di tecnologie a polarizzazione per il contrasto alla risalita di umidità, la valutazione di prodotti innovativi naturali e sostenibili per il contenimento dell'attacco biologico e la mitigazione del danno. Centrale per il progetto è l'esecuzione di una campagna di misure da effettuare presso un sito di grande interesse culturale, dove applicare le tecnologie diagnostiche sviluppate, verificandone ed estendendone i risultati mediante l'integrazione e la fusione multivariata dei dati [6]. A questo fine è stato individuato il bene culturale della **Chiesa di san Rocco all'Ara Pacis** che, situato in prossimità del fiume Tevere, ha strutture murarie e arredi affetti da considerevoli problematiche legate alle infiltrazioni di acqua. La Chiesa di San Rocco rappresenta un caso studio tipico che può largamente beneficiare dell'applicazione di diagnostiche in situ per



Fig. 2 Porzione di muratura interessata da umidità di risalita e conseguente attacco biologico

la valutazione dello stato attuale del deterioramento e che possiede le condizioni ideali per la definizione delle strategie di intervento volte a mitigare gli effetti di danneggiamento dovuti all'umidità.

### Conclusioni

**I progetti REMEDIA e CIACCO si occupano dello sviluppo di strumentazione innovativa e di un approccio integrato per la mappatura dell'umidità presente nei manufatti murari e dei conseguenti processi di deterioramento.** La strategia adottata è multidisciplinare sia in termini di metodiche di misura che di definizione di *best practice* di conservazione e restauro del bene. Dal lato tecnico-scientifico si avvale di metodiche di misura diretta (IRT e NMR) e della loro integrazione con tecniche di valutazione degli effetti indotti dall'umidità (FRAI e LIF), mentre dal lato della gestione si occupa di definire

le strategie di contrasto e mitigazione del danno. L'accento è posto sulla **multidisciplinarietà dell'approccio**, che favorito dalla molteplicità di competenze e tecnologie, dovrebbe essere preferito ogni volta che si pianificano le opere di tutela gestione e valorizzazione conservazione del patrimonio culturale.

Secondo il paradigma di una buona gestione dell'opera d'arte, la tutela si basa sulla indagine diagnostica conoscitiva cui segue il restauro e l'implementazione di azioni di mitigazione degli effetti di deterioramento e infine la pianificazione di un monitoraggio continuo. In questo senso, indagini conoscitive e monitoraggio sono momenti sovrapponibili e realizzano una circolarità dall'azione di gestione e conservazione che evolvendo segue e preserva nel tempo la vita del bene culturale. **I progetti REMEDIA e CIACCO intendono quindi contribuire a supportare la scelta degli interventi più appropriati, riducen-**

do il rischio di applicare rimedi di scarsa efficacia, definendo le azioni di *best practice* volte al recupero ed alla mitigazione degli effetti e non ultimo di prevenire interventi inadeguati, favorendo invece un'azione conservativa aderente al principio del minimo criterio di intervento.

### Ringraziamenti

Si ringrazia la Regione Lazio per la sovvenzione del Progetto REMEDIA - Domanda n. PROT. A0375-2020-

36497 - Avviso Pubblico "Gruppi di ricerca 2020" - POR FESR Lazio 2014-2020 - Azione 1.2.1 - approvato con Determinazione n. G08487 del 19/07/2020- pubblicato sul BURL N.93 del 23/07/2020 - modificato con Determinazione n. G10624/2020- pubblicato sul BURL n. 116 del 22/09/2020, e del Progetto CIACCO- DTC - Intervento TE1 - Centro di Eccellenza composto da Anagrafe delle Competenze e Polo di Innovazione Regionale Diffuso su Tecnologie e Materiali finalizza-

to anche allo sviluppo di artigianato artistico di qualità Det. n. G00471 del 21/01/2020 "Invito al Centro di Eccellenza a presentare progetti per la seconda fase dell'Avviso approvato con Determinazione n. G08622 del 20/06/2017 - Progetti RSI 07/2020 - modificato con Determinazione n. G10624/2020- pubblicato sul BURL n. 116 del 22/09/2020.

*Per info: francesco.colao@enea.it*

### BIBLIOGRAFIA

1. D. Manacorda, Tra ricerca, turismo ed economia, Materiali per Popolonia a cura di G.Facchin e M.Millett, Edizioni ETS, ISBN:978-884673193-7
2. Progetto REMEDIA [www.enea.it/it/fusione-e-sicurezza-nucleare/progetto-remedia](http://www.enea.it/it/fusione-e-sicurezza-nucleare/progetto-remedia)
3. Progetto CIACCO, [www.enea.it/it/fusione-e-sicurezza-nucleare/progetto-ciacco](http://www.enea.it/it/fusione-e-sicurezza-nucleare/progetto-ciacco)
4. Definizione dei livelli di maturità tecnologica [https://esto.nasa.gov/files/trl\\_definitions.pdf](https://esto.nasa.gov/files/trl_definitions.pdf)
5. Calicchia, Paola, Sara De Simone, Lucilla Di Marcoberardino, and Patrizio Verardi. "Exploring the potential of a frequency resolved acoustic imaging technique in panel painting diagnostics." *Measurement* 118 (2018): 320-329.
6. Per un esempio di integrazione strumentale IRT, NMR, FRAI e LIF nell'approccio multidisciplinare del progetto ADAMO vedi Proietti, Noemi, Paola Calicchia, Francesco Colao, Sara De Simone, Valeria Di Tullio, Loredana Luvidi, Fernanda Prestileo, Martina Romani, and Angelo Tati. "Moisture damage in ancient masonry: a multidisciplinary approach for in situ diagnostics." *Minerals* 11, no. 4 (2021): 406.

# La spettroscopia Raman per la cura e la conservazione di beni archivistici

La spettroscopia Raman con scansione di superficie è uno strumento molto importante per gli scienziati in ogni campo perché permette di accoppiare la morfologia del campione in studio con la sua composizione chimica e strutturale. L'ENEA ha sviluppato un protocollo diagnostico particolarmente adatto per la cura e conservazione di beni archivistici che permette di valutare in modo rapido e non-distruttivo lo stato di conservazione dei libri e di valutare l'efficacia dei trattamenti di pulizia punto per punto lungo la pagina.

DOI 10.12910/EAI2022-034

di Sabina Botti, Francesca Bonfigli, Valentina Nigro - *Laboratorio Micro e nanostrutture per la fotonica - ENEA*

I beni archivistici e librari rappresentano un patrimonio di valore incalcolabile perché raccontano la nostra storia. Il supporto scrittorio più diffuso è la carta, il cui costituente principale è la cellulosa, un polimero lineare di origine vegetale, soggetto ad un progressivo e naturale degrado. L'invecchiamento è dovuto a due processi distinti: l'idrolisi che provoca una frammentazione della fibra di cellulosa e l'ossidazione che ne modifica la struttura della catena cellulosica. Conseguenza di questi processi è la perdita di resistenza e l'ingiallimento della carta, con conseguente peggioramento della leggibilità del testo riportato e possibilità di lacerazioni.

La velocità dei processi di degrado della carta dipende sia da caratteristiche intrinseche quali la presenza di lignina, che si ossida molto facilmente, il tipo di inchiostro che impartisce acidità al supporto scrittorio accelerando il processo di idrolisi, il grado di polimerizzazione delle fibre, più alto se derivano dal lino invece che dal legno, e caratteristiche estrinseche come la presenza di polveri nell'atmosfera delle biblioteche, il grado

di umidità, la luce dell'ambiente, l'accuratezza nel maneggiamento.

## Prevenire e rallentare il processo di invecchiamento

L'approccio scientifico per la cura e conservazione del bene librario ha molteplici obiettivi. Tra questi, caratterizzare lo stato di conservazione del supporto scrittorio, evidenziando lo stato di avanzamento del processo di degrado quando ancora non ha provocato danni evidenti, e mettere a punto prodotti e tecniche atti a prevenire e rallentare il processo di invecchiamento. In particolare, per i beni librari le restrizioni sulla possibilità di campionamento limitano la scelta dei metodi analitici e indicano come preferenziali le tecniche spettroscopiche che sfruttano l'interazione luce-materia e sono intrinsecamente non distruttive, non entrando in contatto diretto con il campione da studiare.

L'obiettivo del nostro lavoro è stato sviluppare un protocollo diagnostico non - invasivo per caratterizzare lo stato di conservazione/degrado dei

## beni archivistici e librari applicando la spettroscopia Raman con scansione di superficie.

La procedura utilizzata si sviluppa in passaggi successivi: il primo è visualizzare al microscopio l'area del campione di carta da analizzare e definire una regione di interesse per l'acquisizione come in figura 1a e 1b. Nella regione di interesse si definisce una griglia di punti e per ciascun punto della griglia viene acquisito uno spettro Raman. In figura 1c sono riportati due esempi di spettri Raman acquisiti su carte di epoche diverse. Da ogni spettro Raman vengono estrapolati i parametri utili a definire i marker spettroscopici per costruire un'immagine a falsi colori che corrisponde ad una mappa 2D della struttura e composizione del campione. La mappa Raman così ottenuta è colocalizzata con l'immagine del campione visualizzata al microscopio ottico.

## Libri di diverse epoche

Per portare avanti questo studio, è stato molto importante avere a



disposizione libri di diversa epoca e stato di conservazione, appartenenti ai nostri archivi privati. L'età del libro è certificata dalla data di edizione ed è compresa tra il 1881 e il 2021. Gli spettri Raman sono stati acquisiti selezionando aree diverse nelle zone non stampate della pagina del libro. Confrontando gli spettri Raman riportati in figura 1c, possiamo osservare che le due tracce presentano delle caratteristiche comuni: il picco a  $1100\text{ cm}^{-1}$ , meno intenso nella carta antica, del legame C-O-C tra i monomeri glucosidici e le bande dei gruppi C-H e  $\text{CH}_2$  della cellulosa, che è il costituente principale di entrambi i campioni. Nella carta antica, però, sono presenti dei picchi nella regione  $1550\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$  che non hanno riscontro nella carta moderna, dovuti alla presenza dei gruppi funzionali (e.g. C=O, C=C-O, O-C=O) che per il processo di ossidazione si legano nel

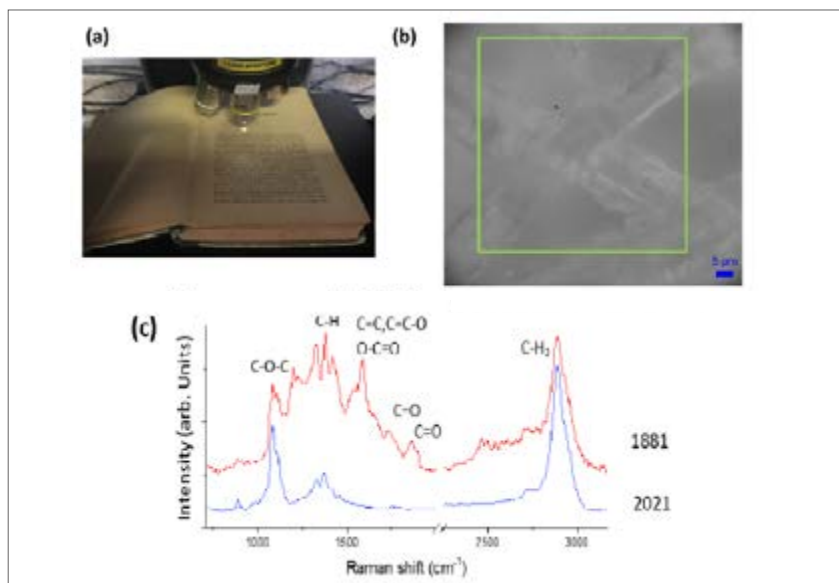


Fig. 1 Libro posizionato sul portacampioni del microscopio ottico accoppiato con lo spettrometro Raman (a) per acquisire un'immagine con obiettivo 100x (b), su cui viene definita l'area dove verranno acquisiti gli spettri Raman seguendo una griglia di scansione prefissata; (c) esempi di spettri Raman acquisiti sulla carta moderna, curva blu, e sulla carta antica, curva rossa.



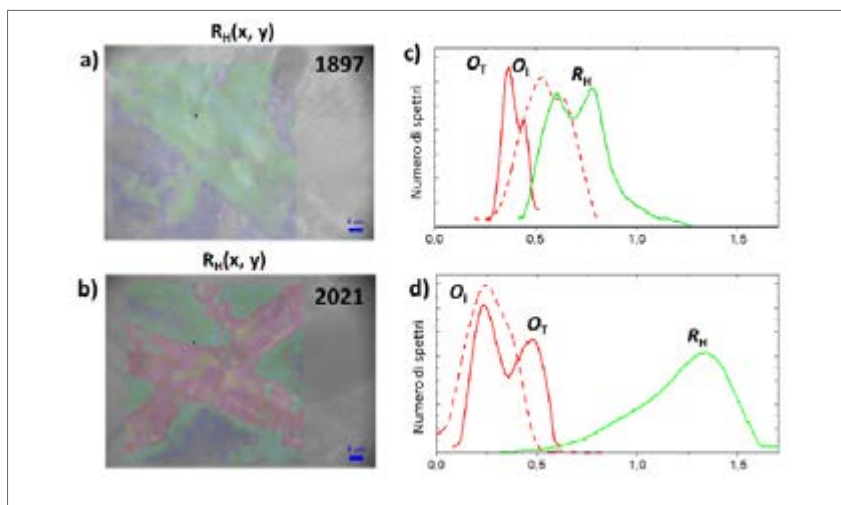


Fig. 2 Mappe Raman e distribuzioni degli indici spettroscopici per campioni di carta antica e moderna: (a) mappa Raman del marker  $R_H$  sovrapposta con l'immagine al microscopio ottico (obiettivo 100x) del campione di carta del 1897; (b) mappa Raman del marker  $R_H$  sovrapposta con l'immagine al microscopio ottico (obiettivo 100x) del campione di carta del 2021; (c) distribuzione dei marker  $R_H$  (curva verde),  $O_I$  (curva rossa tratteggiata),  $O_T$  (curva rossa continua) per il campione di carta del 1897; (d) distribuzione dei marker  $R_H$  (curva verde),  $O_I$  (curva rossa tratteggiata),  $O_T$  (curva rossa continua) per il campione di carta del 2021.

tempo alla catena di cellulosa.

Poter riconoscere, mediante la tecnica spettroscopica, quali gruppi funzionali si siano formati durante i processi di invecchiamento è di fondamentale importanza per pianificare interventi di conservazione del bene archivistico e la spettroscopia Raman può essere validamente impiegata per questo scopo.

Inoltre, è possibile definire, a partire dalle intensità dei picchi e dalle aree  $A$  delle bande interessate, dei marker diversi che sono in grado di discriminare e monitorare l'avanzamento dei processi di ossidazione ( $O_I^1$  e  $O_T^2$ ) e idrolisi ( $R_H^3$ ). Il marker  $R_H$  è proporzionale al numero dei legami tra i monomeri, quindi al grado di polimerizzazione della catena di cellulosa, e con l'avanzamento del processo di idrolisi questo marker diminuisce. I marker  $O_I$  e  $O_T$  descrivono entrambi il processo di ossidazione.

Per ogni punto dell'area scansionata, a partire dallo spettro misurato, è possibile calcolare questi marker e costruire una mappa Raman coloca-

lizzata con l'immagine al microscopio ottico. In figura 2a e 2b sono riportate, rispettivamente, le mappe del marker  $R_H$  per la carta antica e la carta moderna. Nel codice di colori usato

l'intensità crescente viene visualizzata nella gradazione blu - verde - rosso: il valore di  $R_H$  lungo la fibra della carta moderna (colore rosso) è più alto di quello della fibra della carta antica (colore verde). Infatti, la carta antica ha un minore grado di polimerizzazione dovuto all'azione del processo di idrolisi nel tempo. Nelle figure 2c e 2d sono riportate le corrispondenti curve della distribuzione dei valori di  $R_H$  (curve verdi) misurate nelle due aree scansionate per i due tipi di carta insieme alle distribuzioni degli altri marker relativi al processo di ossidazione (curve rosse).

### Trattamenti di pulizia per arrestare il degrado

È molto importante per i beni archivistici e librari sviluppare trattamenti di pulizia per arrestare il degrado del supporto scrittoria con materiali non tossici, come gli idrogel, ed è altrettanto importante poter monitorare questi processi valutandone l'efficacia in - operando. Il principio generale della pulizia della carta mediante idrogel è il rilascio controllato

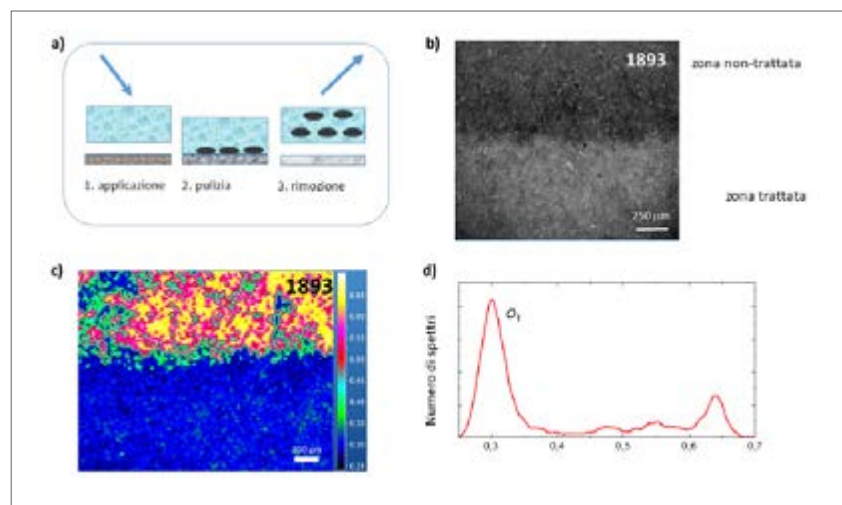


Fig. 3 (a) Schema del processo di pulizia della carta tramite idrogel; (b) immagine al microscopio ottico (obiettivo 10x) della zona di transizione tra la porzione di carta trattata e non trattata con idrogel per 1h e 20 minuti; (c) mappa Raman del marker  $O_T$  nella zona di transizione; (d) distribuzione del  $O_T$  corrispondente alla mappa Raman riportata in (c).

del suo contenuto acquoso al supporto cartaceo e la sua capacità di assorbire i depositi sulla superficie e i contaminanti responsabili del degrado della carta, intrappolandoli nella sua struttura tridimensionale (vedi figura 3a). Per il trattamento della carta antica, in questo caso un campione del 1893, abbiamo utilizzato il Nanorestore gel<sup>®</sup>, di fabbricazione industriale.

L'effetto del trattamento è ben visibile nell'immagine al microscopio ottico riportata in figura 3b. La corrispon-

dente mappa e distribuzione dell'indice di ossidazione  $O_T$ , rispettivamente riportate nella figura 3c e 3d, evidenziano che nella zona non - trattata il valore di questo marker è più alto ( $O_T = 0.65$ , colore giallo-rosso) che nella zona trattata ( $O_T = 0.3$ , colore blu).

In conclusione, la spettroscopia Raman con scansione di superficie è uno strumento molto importante per gli scienziati in ogni campo perché permette di accoppiare la morfologia del campione in studio con la sua composizione chimica e strutturale.

**Il protocollo diagnostico che abbiamo sviluppato permette di valutare in modo rapido e non-distruttivo lo stato di conservazione del bene archivistico e di valutare l'efficacia dei trattamenti di pulizia punto per punto lungo la pagina, ed è particolarmente adatto per la cura e conservazione di beni di importanza storico-artistica.**

*Per info: [sabina.botti@enea.it](mailto:sabina.botti@enea.it)*

1.  $O_I = A_{1640-1850}/A_{1500-1600}$
2.  $O_T = A_{1500-2800}/A_{700-3000}$
3.  $R_H = I_{1100}/I_{1380}$

# L'ENEA per il progetto E-RIHS

Nei prossimi cinque anni, all'interno della piattaforma E-RIHS, l'ENEA sarà impegnata a rendere disponibile tre prototipi di strumenti opto-elettronici basati sull'impiego di fasci laser per imaging spettrale e analisi strutturale remota e il potenziamento dell'infrastruttura delle tavole vibranti, portando il suo contributo alla salvaguardia e diffusione della conoscenza del patrimonio artistico nazionale ed europeo.

DOI 10.12910/EAI2022-035

di Massimiliano Guarneri, *corresponding author*, Luisa Caneve, Violeta Lazic, *Laboratorio Diagnostiche e Metrologia - ENEA* e Ivan Roselli, *Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la Prevenzione del rischio sismico e idrogeologico - ENEA*

**U**na tecnologia è tanto più longeva, quanto più è versatile e applicabile a diversi settori che influenzano la vita dell'uomo. Gli strumenti opto-elettronici sviluppati da ENEA all'interno del progetto E-RIHS, guidato dal CNR, seguono questa filosofia: **nati per consentire l'analisi spettrale e strutturale in ambienti radioattivi (come ad esempio nei reattori a fusione o fissione [1]), nel corso degli anni sono stati adattati per poter essere impiegati con successo anche in altri campi come l'analisi remota e l'esplorazione in ambienti sommersi, diagnostica in campo forense e beni culturali.** È proprio in questo ultimo settore che il progetto E-RIHS pone una sfida e al tempo stesso una spinta affinché la salvaguardia, l'interpretazione e la conservazione del patrimonio culturale nazionale ed europeo possa essere operata attraverso un approccio integrato di tecnologie, dati e conoscenze messi a disposizione di tutta la comunità scientifica.

Il laboratorio di Diagnostica e Metrologia, nella divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute del dipartimento di Fusione, e quello di Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la PREVENZIONE del rischio sismico e idrogeologico nella

divisione Modelli e tecnologie per la riduzione degli impatti del dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi sono stati finanziati, attraverso il progetto E-RIHS Lazio nell'ambito del bando "POTENZIAMENTO DELLE STRUTTURE DI RICERCA PNIR PER ELEVARE IL TASSO DI INNOVAZIONE DEL TESSUTO PRODUTTIVO REGIONALE", per la realizzazione di tre prototipi basati sull'impiego di fasci laser per imaging spettrale e analisi strutturale remota e il potenziamento dell'infrastruttura delle tavole vibranti.

## Dispositivi multispettrali innovativi

**Il primo prototipo sviluppato è l'evoluzione dell'attuale laser scanner a fasci modulati in ampiezza:** tale prototipo ad oggi opera in diverse configurazioni in cui, combinando opportunamente diverse sorgenti laser, è possibile ottenere informazioni di diverso tipo (con tre fasci laser nello spettro del visibile opportunamente combinati è possibile ottenere un modello 3D a colori della superficie interessata, con una sorgente nel vicino infrarosso è possibile ottenere immagini di pochi micron sotto la superficie di tele dipinte per far riemer-

**gere dettagli nascosti e ripensamenti dell'autore [2]).** Il prototipo di laser scanner proposto per E-RIHS, a cui è stato dato il nome di Diapason, prevede l'utilizzo simultaneo di sette lunghezze d'onda - una nell'ultravioletto, quattro nel visibile e due nel primo infrarosso - e, attraverso l'impiego di un complesso sistema ottico, è in grado di restituire modelli tridimensionali multispettrali delle superfici oggetto della misura.

Attualmente i dispositivi multispettrali in commercio, che grazie alla loro diffusione nel campo dei beni culturali consentono una facilità d'uso e una ricchezza di informazioni precedentemente non così accessibili, impongono delle limitazioni in termini di distanza di operatività (da pochi cm a qualche metro), di risoluzione spaziale e necessitano dell'ausilio di dispositivi esterni per generare modelli 3D a cui accoppiare le mappe multispettrali.

**Lo scanner Diapason ha come scopo quello di oltrepassare questi limiti permettendo di operare fino a distanze di 15m** (limitazione dettata dalla scelta delle ottiche per mantenere compatto quanto più possibile il sistema), introducendo una alta risoluzione spaziale (che su superfici cooperative corrisponde a 0,3 mm a

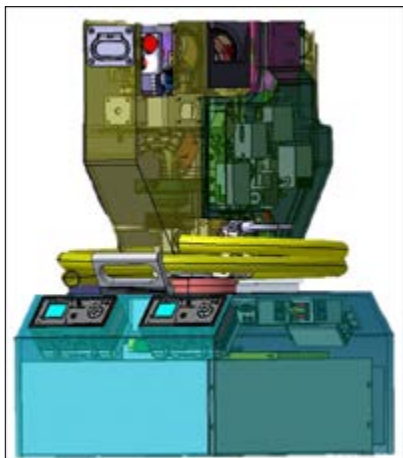


Fig. 1 Modello CAD dello scanner Diapason. Disegno esecutivo di M. Nuvoli

10 m) con un angolo di vista sferico occluso solo al polo inferiore e la generazione nativa di informazioni 3D multispettrali delle scene su cui si opera. Inoltre, come i suoi predecessori, questo scanner non risente dell'influenza causata dalla luce ambientale.

Il secondo prototipo sviluppato è l'evoluzione di diversi sistemi laser prototipali a scansione basati sulla tecnica LIF (Laser Induced Fluorescence) per diversi campi di applicazione. La tecnica permette, attraverso gli spettri e le immagini prodotte, di ottenere informazioni sulla composizione superficiale del campione analizzato [3].

La possibilità di operare a grandi distanze, di essere non distruttivi e non invasivi spiega la crescente applicazione di tali sistemi per la conservazione ed il restauro di beni culturali [4]. La progettazione di sistemi portatili, sempre più compatti e facilmente trasportabili ha l'obiettivo di ampliare l'utilizzo di tali sistemi, sia per quanto riguarda la tipologia di oggetti da analizzare, un'opera d'arte o un sito archeologico, che le caratteristiche e l'esperienza dell'utilizzatore. Il sistema sviluppato in questo progetto è estremamente compatto e di dimensioni ridotte, pur fornendo

risultati spettrali spettroscopici anche di aree di grandi dimensioni, grazie all'inserimento, nel percorso ottico di raccolta, di uno spettrografo e di una ruota portafiltri in grado di operare alternativamente. Inoltre, la rivelazione dei segnali di fluorescenza risolti in tempo, che costituisce uno degli aspetti principali dell'aggiornamento di questa tecnica per il progetto E-RIHS, è favorita, insieme ad una opportuna ottimizzazione dell'elettronica di controllo, dall'impiego di una nuova sorgente laser con specifiche caratteristiche, in particolare breve durata dell'impulso ( $< 2$  ns) e alta frequenza di ripetizione ( $> 200$  Hz), che permette di ridurre le interferenze dei segnali di fluorescenza a tempi brevi rispetto all'impulso laser. In sostanza l'aggiornamento del sistema aumenterà la rapidità di scansione e la capacità di identificare e discriminare materiali superficiali diversi.

#### Gli strumenti per il MOBILE LABoratory MOLAB

Il terzo prototipo sviluppato è l'Integrated Laser Sensor - ILS (Figura

3), realizzato nell'ambito del progetto FP7 EDEN (2013-2016) con lo scopo principale di rilevare a distanza gli esplosivi in traccia. Lo strumento è stato brevettato su target a distanze fino ai 30 metri [7], ed integra quattro tecniche spettroscopiche: Laser Scattering (LS) indotto a 650 nm, LIF e Raman eccitati da laser a 355 nm, e LIBS indotto da laser a 1064 nm. ILS ha due camere a colori: una per il controllo interattivo della scannerizzazione, che permette anche di visualizzare in tempo reale la progressione della misura e i risultati in forma di mappa 2D a due colori, sovrapposta all'immagine reale del target; l'altra camera è usata per visualizzare i dettagli ad alto ingrandimento attraverso il telescopio. Lo strumento è stato testato per varie applicazioni, incluso per beni culturali [8], mostrando la capacità di fornire moltissime informazioni importanti come: lo stato della superficie, le aree contenenti sporcizia da materiali polverosi o ungenti, la composizione molecolare e la composizione atomica - quest'ultima può determinare anche la distribuzione elementale nei primi 1-2 millimetri di profondità.

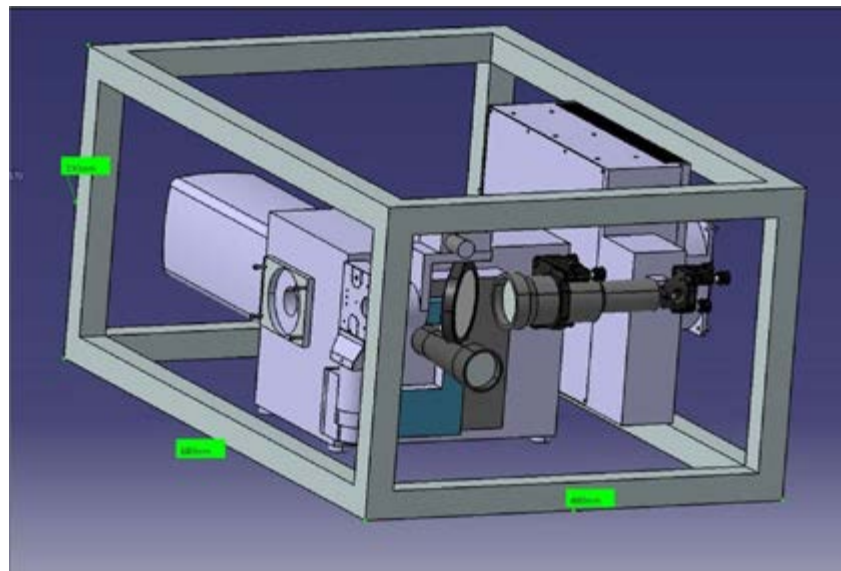


Fig. 2 Modello CAD del fluorosensore sviluppato per il progetto. disegno esecutivo di M. Nuvoli

Nell'ambito del progetto E-RIHS sono state introdotte alcune modifiche: di tipo hardware, per minimizzare l'influenza della luce ambientale sulle misure Raman e LIF, per estendere l'intervallo spettrale del segnale Raman catturato e per aumentare la velocità d'acquisizione di spettri LIF; di tipo software (di proprietà dell'ENEA) per adeguarlo ai nuovi componenti hardware, migliorandolo nell'interfaccia grafica e in alcune funzioni (come l'autofocus e la calibrazione) e introducendo delle nuove mappe tematiche 2D a vari colori per rappresentare i risultati d'interesse per beni culturali.

Gli strumenti appena descritti sono stati inseriti nella facility di E-RIHS denominata MOLAB (MOBILE LABORATORY), un laboratorio mobile, attrezzato di volta in volta con le tecnologie scelte dal committente e proposta dall'equipe di esperti di E-RIHS per effettuare le analisi richieste sul bene da studiare direttamente dove è collocato: questa procedura consente analisi del patrimonio artistico che risulta inamovibile o quando il trasporto risulta rischioso.

### Gli strumenti per il FIXLAB

Come accennato precedentemente l'ENEA ha ottenuto il finanziamento anche per il potenziamento dell'infrastruttura delle tavole vibranti. Tale infrastruttura è stata inserita nella facility denominata FIXLAB, nella quale diagnostiche inamovibili vengono sfruttate o per particolari analisi (si pensi ad esempio alle macchine per eseguire TAC sulle opere) o, come nel caso delle tavole vibranti, per lo studio delle risposte di strutture sottoposte a sollecitazioni sismiche.

Le strumentazioni acquisite sono indirizzate ad aumentare l'accuratezza delle misure di vibrazione e le potenzialità del laboratorio nella diffusione e valorizzazione dei risultati della ricerca nazionale ed europea e dello sviluppo tecnologico sulla protezione

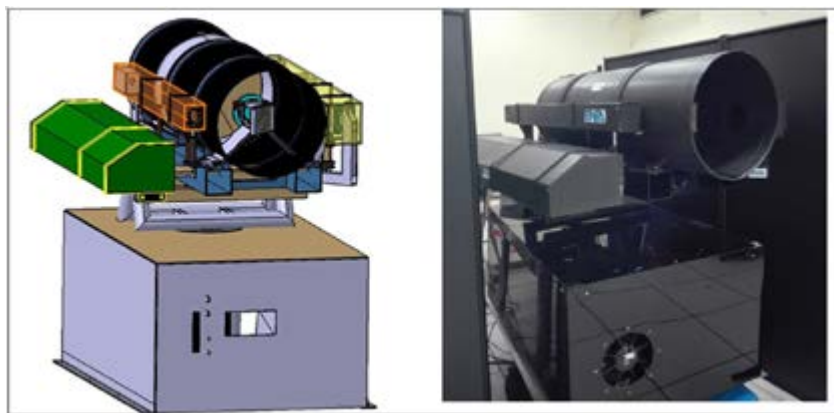


Fig. 3 Sinistra - Disegno tecnico dell'insieme per lo strumento ILS; Destra - foto dello strumento realizzato

sismica delle costruzioni storiche e delle opere di rilievo per il patrimonio storico-artistico.

Uno dei miglioramenti dell'attuale sistema per il progetto è stato quello di introdurre una nuova centralina di acquisizione di sensori accelerometrici ad alte prestazioni per la caratterizzazione dinamica di oggetti e strutture sottoposte alle sperimentazioni su tavola vibrante.

Uno dei punti di forza di questa piattaforma di simulazione è quello di consentire la visione della risposta delle strutture alla sollecitazione sismica prodotta attraverso un sistema di tracciamento basato sulla cattura tridimensionale del movimento, chiamato 3DVision [5]. Per il progetto si è pensato di aumentare il numero di camere ad alta risoluzione nel vicino infrarosso, che ne aumentano l'accuratezza nelle misure di spostamento delle singole parti della struttura. Inoltre i risultati di questo sistema sono condivisi in tempo reale attraverso la rete, sfruttando le potenzialità del laboratorio virtuale DYSCO [6].

### Conclusioni

L'ENEA sarà impegnata nei prossimi cinque anni a rendere disponibile i prototipi descritti all'interno della

piattaforma E-RIHS, portando il suo contributo alla salvaguardia e diffusione della conoscenza del patrimonio artistico nazionale ed europeo. Le future generazioni disporranno di informazioni estremamente preziose dello stato attuale delle opere d'arte: la possibilità di vedere e conoscere l'opera attraverso analisi che uniscono l'informazione visiva a tecniche spettrografiche, diagnostiche e simulazioni strutturali introduce nuovi metodi di lettura di un manufatto, narrandone in alcuni casi la sua genesi (si pensi ad esempio ai cosiddetti pentimenti dell'artista), la sua evoluzione conservativa (interventi di restauro, materiali che hanno più o meno impattato sui processi di degrado dell'opera) e le sue fragilità causate da effetti antropici o naturali.

### Ringraziamenti

Il progetto E-RIHS vede attivamente coinvolti altri ricercatori e tecnici dell'ENEA, oltre agli autori stessi. In particolare si ringraziano Marcello Nuvoli, Valeria Spizzichino, Massimo Francucci, Massimiliano Ciaffi e Marco Pistilli.

Per info: [massimiliano.guarneri@enea.it](mailto:massimiliano.guarneri@enea.it)

# Stampa 3D e nanomateriali per riparare i danni del tempo

La ricostruzione di parti mancanti di un edificio, che siano pareti o elementi decorativi, può contribuire a conservare il monumento e a restituire alla collettività il godimento del bene. Il progetto di ricerca ‘Soluzioni di stampa 3D per il recupero strutturale e architettonico di beni culturali’ si basa sull’idea innovativa di utilizzare questa tecnologia per integrare lacune architettoniche e/o strutturali del bene con elementi costruttivi o decorativi, nel rispetto della reversibilità, durabilità e riconoscibilità dei materiali.

DOI 10.12910/EAI2022-036

di Rosaria D’Amato, Laboratorio di Micro e Nanostrutture per la fotonica ENEA, Maura Imbimbo e Assunta Pelliccio, Università di Cassino e del Lazio meridionale, Sonia Marfia, Università degli studi di Roma TRE

**G**li eventi naturali catastrofici e atmosferici e i fattori antropogenici possono deteriorare i manufatti e le costruzioni esposte in ambiente esterno e tale deterioramento può influire sia sull’estetica del monumento sia sulla sua stabilità, rendendo quindi difficile o addirittura impossibile la sua fruibilità al pubblico. La ricostruzione di parti mancanti di un edificio, siano essi pareti o elementi decorativi, può contribuire a conservare il monumento e a restituire alla collettività il godimento del bene sia in termini estetici che prestazionali.

**Il progetto di ricerca 3DH-solutions (Soluzioni di stampa 3D per il recupero strutturale e architettonico di beni culturali) si basa sull’idea innovativa di utilizzare la stampa 3D per la realizzazione di elementi costruttivi e decorativi necessari ad integrare lacune architettoniche e/o strutturali del bene nel rispetto della reversibilità, durabilità e riconoscibilità dei materiali.**

Nell’ultimo decennio l’utilizzo e la sperimentazione della tecnologia alla

base della stampa 3D si sono ampiamente diffusi, con applicazioni in vari settori ed hanno anche mostrato interessanti potenzialità in molti altri ambiti, come quello dei Beni Culturali. La tecnologia di stampa 3D è in grado di fornire riproduzioni fisiche di elementi scultorei e particolari architettonici con una elevatissima precisione dei dettagli. Tali riproduzioni possono essere usate in ambito museale per una fruizione “interattiva” del pubblico con l’opera d’arte, ma anche per ricostruzioni di opere incomplete, utilizzate per un restauro integrativo o come oggetto di studio e ricerca.

## Il progetto di ricerca 3DH-solutions

E’ proprio nell’ambito del **restauro integrativo che si sviluppa il progetto di ricerca 3DH-solutions** ed in particolare in due tipologie di applicazioni. Da un lato, si considerano elementi per la ricostruzione parziale di pareti in muratura regolare. Dall’altro, la ricerca si concentra sulla ricostruzione di soli elementi decorativi, quali ad esempio i cornicioni, le decorazioni

dei palazzi storici o le merlature di opere architettoniche, che rappresentano una delle situazioni di degrado più diffuse e comuni del patrimonio costruttivo italiano.

Questi due tipi di applicazioni sono concepite esplicitamente per i due casi studio oggetto di questo progetto: la Rocca Janula di Cassino e il palazzo Orsini in Amatrice. La **Rocca Janula di Cassino** è una fortezza medievale del X secolo ed uno dei più significativi monumenti per la comunità locale e della Terra Sancti Benedicti. Il monumento, già oggetto di un importante restauro, presenta ancora una torre con significative lacune strutturali. L’obiettivo è di testare la possibilità di ricostruzione parziale di alcuni volumi con l’inserimento di elementi realizzati mediante stampa 3D. Il **palazzo Orsini** sito in Amatrice fu costruito nel XVII secolo ed è stato quasi completamente distrutto dal terremoto del 2016. Questo edificio ha un forte valore identitario per la comunità locale ed è attualmente oggetto di interesse per la sua ricostruzione. Il palazzo presentava interessanti elementi

decorativi in facciata ed era caratterizzato da una epigrafe posta su un architrave, recentemente recuperata dalla Soprintendenza insieme ad altri fregi. L'obiettivo è realizzare la stampa 3D di questi elementi decorativi per apporli all'edificio senza inficiare le sue nuove caratteristiche sismiche e strutturali.

### I vantaggi della stampa 3D

L'utilizzo della stampa 3D offre particolari vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali: la possibilità di riprodurre elementi di qualsiasi geometria anche complessa, un rapporto vantaggioso tra peso e prestazioni meccaniche, particolarmente importante negli edifici storici in zona sismica o con problemi strutturali, la possibilità di utilizzo di materiali ecosostenibili, la riduzione dei tempi e dei costi richiesti dall'intervento di ripristino e/o restauro.

Il punto di partenza del progetto è la fase di conoscenza del bene architettonico attraverso il suo rilievo e la sua rappresentazione digitale. La combinazione del rilievo tridimensionale e della stampa 3D costituiscono, infatti, un binomio indispensabile per garantire la conoscenza sia del bene in ogni dettaglio che delle sue lacune e, quindi, consentire la riproduzione delle parti mancanti, la possibilità di correggere eventuali errori ed apportarne le necessarie modifiche, di as-

sicurare una perfetta corrispondenza tra le parti dell'oggetto, diventando un'alternativa più precisa e più veloce di un eventuale processo manuale.

**Un altro aspetto importante e innovativo del progetto è la sperimentazione di nuovi nanomateriali con cui realizzare gli elementi integrativi sempre mediante stampa 3D.** Nanoparticelle di materiali ceramici opportunamente scelte, possono incrementare le proprietà meccaniche della matrice in cui sono disperse e possono conferire al materiale proprietà funzionali interessanti e ad alto valore aggiunto, quali l'idrofobicità, capacità autopulenti e biocide e anche la capacità di abbattere inquinanti atmosferici.

La realizzazione degli elementi da installare viene fatta a valle di una progettazione che è svolta su due piani, quello della **modellazione numerica** e quello della **validazione sperimentale** e privilegiando aspetti di sostenibilità ambientale. L'intero processo produttivo tiene sempre in considerazione i requisiti necessari agli interventi sul patrimonio architettonico e quindi tende ad ottenere una maggiore reversibilità, durabilità e distinguibilità dei materiali e degli interventi. Il progetto 3DH-solutions è stato finanziato dalla Regione Lazio ed è svolto da un gruppo di organismi di ricerca composto dall'Università degli Studi Roma Tre, dall'Università di Cassino e del Lazio Meridionale

e dall'ENEA, ma coinvolge anche imprese specializzate nel restauro e nella stampa 3D. Le competenze interdisciplinari dei ricercatori, ingegneri, chimici ed architetti coinvolti nel progetto e la sinergia tra le competenze tecnico-scientifiche e industriali coinvolte nel progetto, possono contribuire a "industrializzare" dei processi, attualmente "artigianali" e realizzati con materiali e tecniche tradizionali, ampliando quindi anche il loro campo di applicazione. **Inoltre si può favorire lo sviluppo del settore industriale della stampa 3D nell'ambito del patrimonio architettonico e della sua conservazione e fruibilità, oltre che migliorare la conoscenza nel campo della progettazione strutturale di elementi in stampa 3D.** Le stesse istituzioni lavorano insieme anche nel progetto H-S3D, finanziato sempre dalla Regione Lazio nell'ambito del Centro di Eccellenza DTC - Lazio (Distretto Tecnologico Beni e Attività Culturali), con il quale si condivide uno dei casi studio e l'utilizzo della stampa 3D.

### I primi risultati

Il progetto è tuttora in corso e le attività previste sono iniziate in maniera parallela per poi convergere, nella seconda parte del progetto, verso il prodotto finale, cioè la realizzazione degli elementi da installare nelle lacune del bene architettonico, nonché delle connessioni di tali elementi con la struttura esistente.

Nel caso di studio, Palazzo Orsini di Amatrice, con la fotogrammetria digitale è stato rilevato un elemento decorativo con incisione di una finestra, presso l'hangar nel quale la Soprintendenza di competenza ha raccolto e collezionato i resti degli edifici dopo il sisma del 2016. La nuvola di punti acquisita è stata importata secondo la procedura Scan to BIM all'interno di un software parametrico informatico per ottenere un modello digitale di elevata precisione utilizzato per la mo-



dellazione digitale di stampa 3D.

Nanoparticelle di silice (SiO<sub>2</sub>), carburo di silicio (SiC) e biossido di titanio (TiO<sub>2</sub>) sono state sintetizzate per pirolisi laser, una tecnica di sintesi che ci ha permesso di produrre nanoparticelle di circa 20 nm in grandi quantità e prive di contaminazioni. Tali nanomateriali sono stati scelti per le loro proprietà consolidanti, idrofobiche ed anche biocide per essere usati come additivi nel polimero utilizzato per la stampa 3D, la produzione del quale come nanocomposito è in corso.

E' stato sviluppato un modello numerico per descrivere il comportamento meccanico di elementi ottenuti mediante la stampa 3D. Tale modello tiene conto della struttura del materiale alle differenti scale di osservazione. È stato validato riproducendo i risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

Sono stati realizzati diversi provini in materiale termoplastico mediante la tecnologia di stampa 3D a deposizione fusa del filamento (fused deposition modelling FDM) e sono state realizzate delle prove sperimentali a trazione ed a flessione per studiare il comportamento meccanico del materiale in funzione di alcuni parametri di stampa. Segue poi la fase di progettazione delle prove su provini additivati con nanoparticelle. Sono state poi effettuate alcune stampe di prova di parti di elementi decorativi della facciata di palazzo Orsini.

**Queste prime attività inquadrano il progetto ad una maturità tecnologica (TRL) di tecnologie validate in laboratorio, ma già pronte per essere applicate in sistemi reali. L'interazione fra mondo della ricerca, mondo industriale e mondo professionale**

**nel campo dei beni culturali, che avviene nell'ambito di questo progetto, favorisce il trasferimento delle competenze e delle tecnologie nell'ambito delle pratiche di recupero integrativo sia di elementi architettonici che strutturali, al fine di consentire il ripristino di beni in disuso con un beneficio fondamentale per la fruizione del patrimonio architettonico.**

### Ringraziamenti

Il progetto 3DH-solutions è stato finanziato dalla Regione Lazio nell'ambito del Bando Pubblico "Progetti di Gruppi di Ricerca 2020", POR FESR Lazio 2014-2020.

*Per info: [rosaria.damato@enea.it](mailto:rosaria.damato@enea.it)*



# Tecniche di imaging 3D ad alta risoluzione

La tecnologia, e in particolare le tecniche di imaging 3D come la fotogrammetria e l'uso di sistemi laser scanner, può essere estremamente utile per la tutela, fruizione, catalogazione, divulgazione e valorizzazione dei beni culturali, favorendone l'accessibilità e la conoscenza [1]. Un esempio sono gli studi eseguiti dall'ENEA presso l'antica Spezieria di Santa Maria della Scala a Roma, la 'Farmacia dei Papi', dove queste tecnologie sono state applicate con successo nell'ambito del Progetto 'Roma Hispana'.

DOI 10.12910/EAI2022-037

di Massimo Francucci<sup>1</sup>, Massimiliano Guarneri<sup>1</sup>, Roberta Fantoni<sup>1</sup>, Massimiliano Ciaffi<sup>1</sup>, Marco Pistilli<sup>1</sup>, *Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute - ENEA*, Marialuisa Mongelli<sup>2</sup>, Samuele Pierattini<sup>2</sup>, Marco Puccini<sup>2</sup>, *Divisione per lo Sviluppo di Sistemi per l'Informatica e l'ICT - ENEA*

Beni Culturali (BC) sono una ricchezza di inestimabile valore e il nostro Paese vanta il patrimonio culturale più consistente al mondo, con opere d'arte uniche e preziosissime. Tuttavia, questi tesori non sono sempre preservati dal degrado in modo ottimale e talvolta neanche facilmente accessibili e di agevole fruizione a causa della distanza di osservazione cui è costretto il visitatore, della scarsa/inadeguata illuminazione, dell'eccessivo affollamento del sito che le ospita. **La tecnologia, e in particolare le tecniche di imaging 3D come la fotogrammetria e quelle basate sull'uso di luce laser (sistemi laser scanner), può essere uno strumento estremamente utile a servizio dell'arte per la tutela, fruizione, catalogazione, divulgazione e valorizzazione dei BC, favorendone l'accessibilità e la conoscenza [1].** A tale scopo nella Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute dell'ENEA sono stati realizzati dei laser scanner denominati **Imaging Topological Radar (ITR)** tra

i quali il **Red Green Blue-ITR (RGB-ITR)** che ricopre un ruolo importante nel campo della tutela e fruizione dei beni culturali per le sue interessanti caratteristiche e applicazioni [2, 3]. Questi strumenti sono stati utilizzati presso uno dei luoghi più affascinanti di Roma, la 'Farmacia dei Papi', ovvero la Spezieria di Santa Maria della Scala a Roma, la più antica d'Europa istituita nella seconda metà del XVI secolo e attiva fino alla metà del secolo scorso. **Le campagne di misura sono state eseguite nell'ambito del progetto "Roma Hispana. Nuevas tecnologías aplicadas al estudio histórico, la musealización y la puesta en valor de Patrimonio Cultural español en Roma: la Spezieria di Santa Maria della Scala"** coordinato dall'Università di Valencia (Spagna). Nella spezieria, gestita dall'Ordine dei Carmelitani Scalzi, sono state applicate con successo tecnologie laser scanner (RGB-ITR) e fotogrammetriche per la digitalizzazione 3D degli ambienti di interesse.

In parallelo alla scansione sul campo effettuata con l'RGB-ITR, la Divisione per lo Sviluppo di Sistemi per l'Informatica e l'ICT dell'ENEA ha contribuito al progetto mediante **l'uso della tecnica fotogrammetrica**, in una campagna di misure *in situ* nel maggio 2021, per realizzare il **modello 3D** di un antico armadio situato nella Sala delle Vendite (sala principale) della spezieria, formato da quattro parti: tre delle quali contenenti cassetti per le spezie e la quarta una vetrina con manufatti di sale cristallizzato. **L'obiettivo è volto alla valorizzazione dell'opera investigata per consentirne la fruizione da remoto e arricchire la documentazione digitale del museo della Spezieria [4].** La ricostruzione 3D fotogrammetrica è stata realizzata con **accesso remoto, via ENEAGRID, mediante la piattaforma virtuale ENEA ICT per i BC denominata IT@CHA.** In supporto/integrazione, qualora necessario, del rilievo laser RGB-ITR è stata anche



Fig. 1 Dettaglio del modello 3D a colori della Sala delle Vendite ottenuto con RGB-ITR. L'alta risoluzione raggiunta permette di leggere sia le scritte presenti nella sala come quelle della targa situata sopra la porta di ingresso e sia di rilevare la presenza di crepe sulle pareti e sul soffitto della sala come mostrato in figura dove sono ben visibili le crepe su uno stemma presente sul soffitto.

eseguita una scansione fotogrammetrica del soffitto della sala principale dell'antica Spezieria.

#### Laser scanner RGB-ITR e fotogrammetria

Con l'RGB-ITR<sup>1</sup> si ottiene la digitalizzazione 3D a colori ad alta risoluzione (minimo dettaglio apprezzabile inferiore al mm fino a 15m di distanza) e ad alta fedeltà di

scene reali e di opere d'arte anche di grandi dimensioni. L'RGB-ITR non necessita di costose e ingombranti impalcature/ponteggi per scansionare l'opera d'arte investigata fornendone un modello 3D a colori ad alta definizione e accuratezza completamente navigabile in cui si raggiungono livelli di zoom molto spinti per ammirare l'opera in tutta la sua bellezza. In tale modello, che è privo di ombre, l'informazione

Tab. 1 Caratteristiche hardware della macchina utilizzata sia per la ricostruzione fotogrammetrica che per la costruzione del modello 3D.

OS	Linux 64bit Centos 7.3
CPU	2x Intel(R) Xeon(R) Platinum 8160 2.10 GHz
Memory	188GB
GPU	Tesla V100m
Photogrammetry software	Agisoft Metashape v1.7.2
3D model software	Blender v2.82

colorimetrica non risente delle condizioni di illuminazione ambientale fornendo così un efficiente *rendering* del colore. Per ogni punto campionato (pixel) l'RGB-ITR acquisisce simultaneamente le informazioni di distanza (struttura/*mesh*) e colore (riflettività/*texture*) del target.

Il processo di ricostruzione fotogrammetrica è suddiviso in fasi successive, di seguito descritte. Il primo passo del flusso di lavoro è stato quello di ottenere un'acquisizione veloce delle immagini con una fotocamera Fuji X-T20 a specchio e compatta dotata di un sensore APS-C con 24 Megapixel. Per ottenere una serie completa di immagini, anche della parte superiore dell'armadio, la fotocamera è stata montata su una barra estensibile. Con questa semplice configurazione è stato possibile realizzare una scansione completa sia della parte interna che esterna dell'armadio (con ante aperte/chiusse) in circa mezz'ora. Il secondo passo è stato quello di caricare le immagini sulla piattaforma IT@CHA, un ambiente software ospitato dalla infrastruttura HPC ENEA Cresco<sup>2</sup>, che permette di lavorare con software di calcolo grafico in remoto grazie ad una semplice connessione web [6]. Una volta caricate, le immagini sono state elaborate con il software Agisoft Metashape per ottenere una ricostruzione 3D grazie all'algoritmo SfM (Structure from Motion).

Le risorse hardware che ospitano la piattaforma (Tabella 1) hanno permesso di ottenere un modello dettagliato dell'armadio interno ed esterno in meno di sei ore, partendo da 473 immagini della parte esterna e 152 della parte interna.

#### I risultati

In accordo con la Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma dal 10 al 14 maggio e dal 25 al 29 ottobre 2021 sono state effettuate due campagne di misure

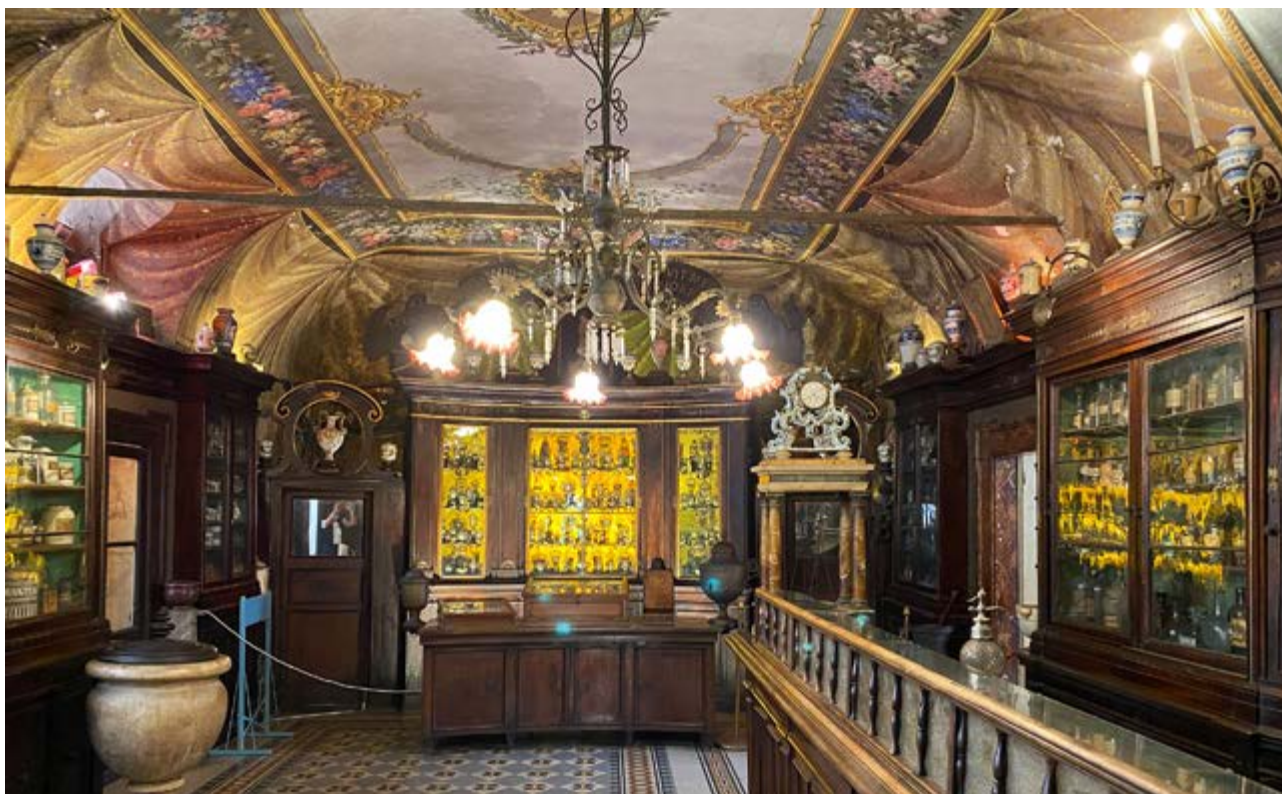


Fig. 2 Immagine fotografica della Sala delle Vendite (Spezieria di Santa Maria della Scala, Roma)

con RGB-ITR presso la Spezieria con l'obiettivo di riprodurre digitalmente in 3D e a colori ad alta risoluzione la Sala delle Vendite per consentire la musealizzazione virtuale, fornendo un modello completamente navigabile che risulti il più completo e fedele possibile. I rilievi laser effettuati nel range 2.5m–7.5m hanno richiesto un tempo totale di acquisizione di 80 ore. Hanno avuto il duplice scopo di consentire l'analisi dello stato di conservazione delle superfici investigate, per una eventuale pianificazione di interventi di restauro o recupero, e la raccolta di documentazione in forma di immagini digitali e modelli 3D a colori ad alta risoluzione per la promozione, valorizzazione e fruizione virtuale della sala rendendola accessibile al pubblico interessato oltre che agli esperti del settore: storici dell'arte,

restauratori, ecc.

Tale sala (7m x 4.5m x 4m) ha rappresentato una sfida intrigante per l'RGB-ITR poiché caratterizzata dalla presenza di numerose vetrine con oggetti in vetro in grado di riflettere la luce laser in varie direzioni alterando così le misure, di un ingombrante lampadario nel centro della sala e di un'asta metallica vicino al soffitto parzialmente affrescato. Essi hanno rappresentato ostacoli significativi alla luce laser in fase di misura. Malgrado ciò interessanti risultati preliminari dell'intera sala sono stati ottenuti con l'RGB-ITR fornendone una riproduzione virtuale 3D a colori di alta qualità. Nella Figura 1 sono invece mostrati dettagli del modello ottenuto con RGB-ITR. Essi consentono di apprezzare l'alta risoluzione raggiunta che è tale da permettere di leggere

le scritte presenti nella sala come quelle di una targa affissa sopra la porta di ingresso e di rilevare la presenza di crepe (Figura 1) le cui dimensioni millimetriche possono essere valutate direttamente dai dati RGB-ITR. Tali informazioni possono essere estremamente utili ai restauratori per studiare lo stato di conservazione della sala mostrata in Figura 2 individuando le eventuali aree soggette a maggior degrado e che necessitano di interventi di recupero/restauro.

Per consentire la fruizione della parte interna dell'armadio, è stato necessario utilizzare il software Open Source Blender, fondendo i modelli sia della parte interna che esterna per ottenere una versione con le persiane aperte che permettesse di rendere visibile l'interno dell'armadio sia con il suo conte-

nuto di scatole di spezie che i suoi preziosi ritratti e dipinti (Figura 3).

## Conclusioni

I risultati preliminari presentati sono di notevole interesse per quanto riguarda la produzione di un modello RGB-ITR 3D a colori del locale storico della Sala delle Vendite della Spezieria. Malgrado ciò l'elaborazione della grande mole di dati acquisiti necessita ancora di tempo per ottenere un migliore *rendering* dell'informazione colorimetrica e per una migliore ottimizzazione della *mesh*. I risultati finora ottenuti possono comunque essere utili per permettere la musealizzazione virtuale e la fruizione ad alta qualità della Sala delle Vendite al pubblico interessato e lo studio del suo stato di conservazione per facilitare l'individuazione delle aree dove sono necessari interventi di restauro e per una loro efficiente programmazione.

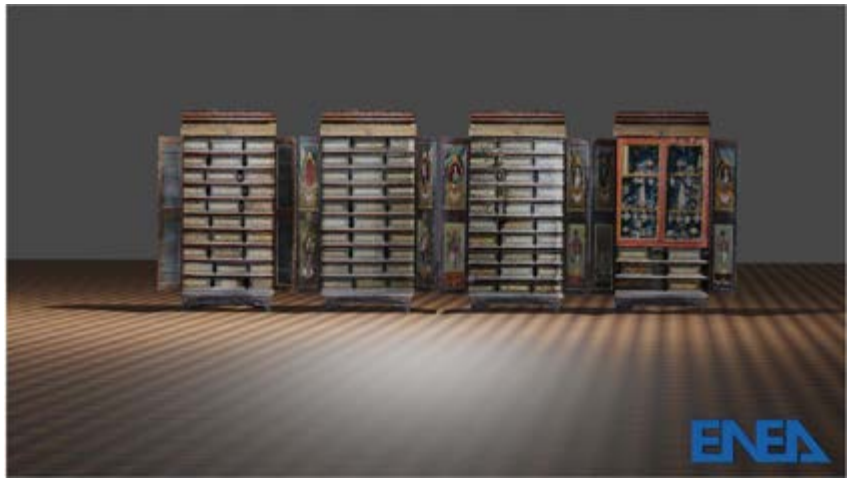


Fig. 3 Il modello 3D dell'armadio ottenuto con Blender.

**Il flusso di lavoro della ricostruzione fotogrammetrica ha dimostrato che tali tecnologie e metodologie permettono di ottenere buoni risultati grazie a un'acquisizione ed elaborazione delle immagini veloce ed economica. Questo porta la meto-**

**dologia ad essere un valido supporto ad altre tecnologie di diagnostica e rilievo, in un'ampia gamma di casi d'uso nel campo dei beni culturali.**

*Per info: massimo.francucci@enea.it*

## BIBLIOGRAFIA

1. G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio (2009), "State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation", *Sensors* 9, 568-601.
2. M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, R. Ricci (2012), "Remote colorimetric and structural diagnosis by RGB-ITR color laser scanner prototype", *Advances in Optical Technologies* 2012, 1-6.
3. S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Romani, L. Giacopini, M. Francucci, M. Ciaffi, M. Ferri De Collibus, A. Puiu, G. Verona-Rinati, F. Colao, R. Fantoni (2021), "Are the blue daemons really blue? Multidisciplinary study for the colours characterization of the mural paintings inside the Blue Daemons Etruscan tomb", *Journal of Cultural Heritage* 47, 257-264.
4. M.L. Vazquez et al., R. Fantoni, M. Francucci, M. Guarneri, M. Mongelli, S. Pierattini, M. Puccini, "3D models acquisition and image processing for virtual fruition of the Spezieria of Santa Maria della Scala in Rome", submitted to *Heritage*.
5. S. Poujoul, B. Journet (2002), "A twofold modulation frequency laser range finder", *Journal of Optics A* 4, S356-S363.
6. M. Mongelli, G. Chiellini, S. Migliori, A. Perozziello, S. Pierattini, M. Puccini, A. Cosma (2019), "Photogrammetry and structured light: comparison and integration of techniques in survey of the Corsini Throne at Corsini Gallery in Rome", In *Proceedings of International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo 2019)*, Florence 4-6 December 2019, Italy, pp 166-171.

1. Usa la tecnica attiva laser range finding a doppia modulazione di ampiezza (Amplitude Modulation, AM) [5] e opera nel visibile tra 2.5m e 35m impiegando tre sorgenti laser che emettono luce secondo i tre colori primari RGB: Red@660nm (frequenza di modulazione  $f_m=190\text{MHz}$ ), Green@517nm ( $f_m=3\text{MHz}$ ) e Blue@440nm ( $f_m=1-10\text{MHz}$ ).
2. Il supercalcolatore CRESCO, "Centro Computazionale di RicErca sui Sistemi Complessi", si trova presso il Centro Ricerche ENEA di Portici ed è la seconda più importante infrastruttura di calcolo ad alte prestazioni ("HPC- High Performance Computing") della ricerca pubblica in Italia.

# Le tecniche neutroniche applicate ai beni culturali

Negli ultimi anni il numero di tecniche neutroniche applicate al campo dei beni culturali è cresciuto enormemente e numerosi sono stati gli sforzi internazionali per sviluppare postazioni per misure dedicate nelle large-scale facility, diffuse in Europa e nel mondo, per produrre e utilizzare i neutroni. ENEA supporta ormai da anni la ricerca nell'ambito dello sviluppo di tecnologie per i beni culturali e sta valutando la possibilità di dotare il territorio della regione Lazio di un impianto adatto per l'applicazione di tecniche neutroniche nel campo dei beni culturali.

DOI 10.12910/EAI2022-038

di Valentina Nigro, *Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica*, Roberta Fantoni, *Responsabile Divisione Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute*, Rosa Maria Montereali, *Responsabile Laboratorio Micro e Nanostrutture per la Fotonica*, Mario Pillon, *Laboratorio Tecnologie Nucleari - ENEA*

**Il ruolo che la scienza e la tecnologia hanno assunto nella tutela del patrimonio culturale è cresciuto enormemente negli ultimi anni, grazie alla capacità di proporre metodi innovativi di datazione e autenticazione, indagini macro e microstrutturali e analisi quantitative della composizione dei materiali.** Queste metodologie offrono, infatti, un enorme contributo conoscitivo nella gran parte degli studi sui beni culturali, fondamentale per la corretta determinazione del contesto storico e artistico degli artefatti, del metodo di produzione e della loro localizzazione temporale e spaziale, oltre che all'identificazione dei trattamenti più adeguati e delle condizioni ambientali ideali per la loro corretta conservazione. Nonostante il grande numero di tecniche impiegate nella caratterizzazione di beni di rilievo culturale, molti di questi metodi non possono essere considerati del tutto non-in-

vasivi e spesso non consentono studi sull'intero volume dell'artefatto senza ricorrere al campionamento o addirittura al danneggiamento dell'intera opera.

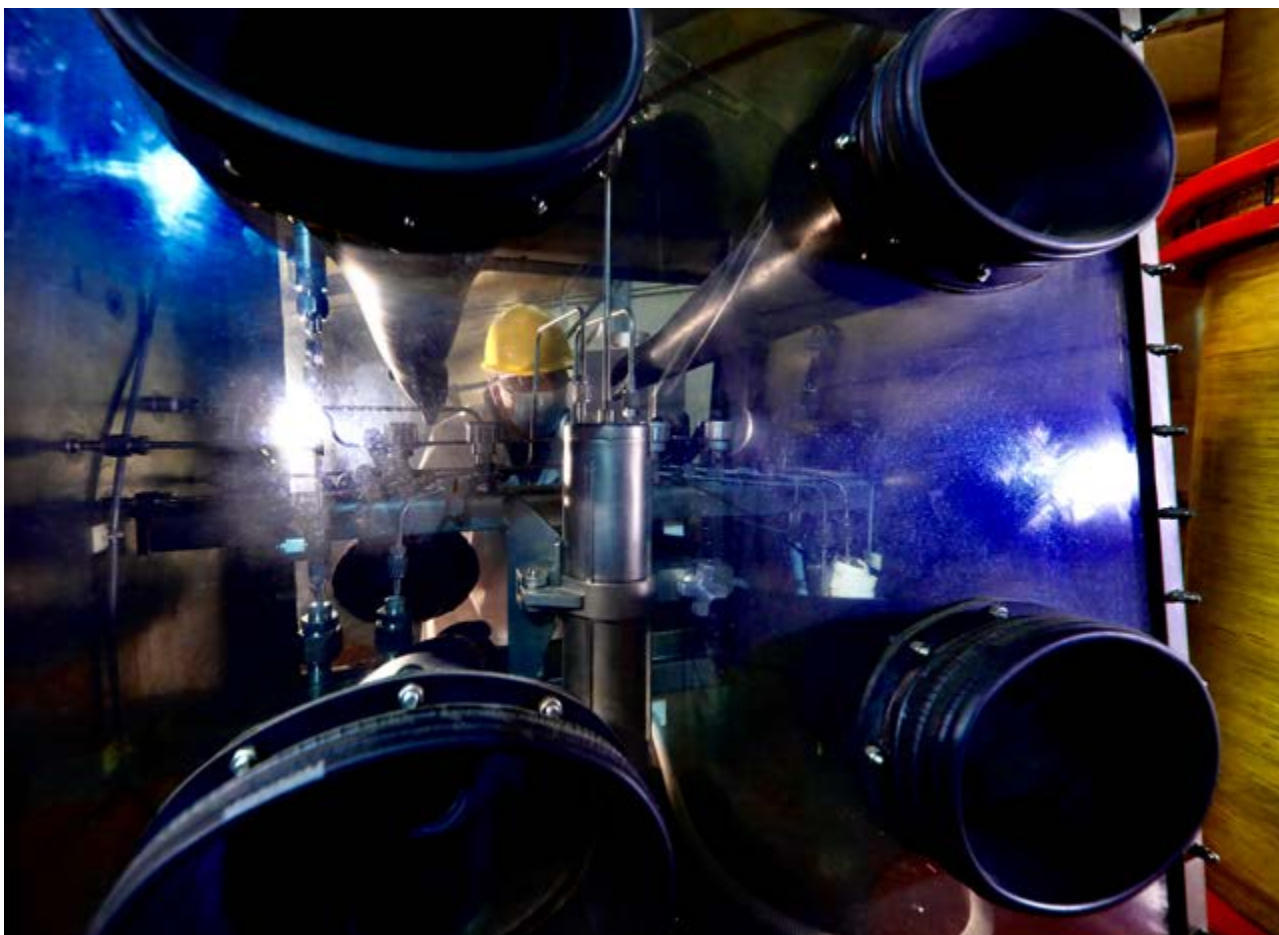
**Uno strumento sempre più allettante per diagnostiche su beni culturali di natura diversa**

**Negli ultimi decenni le tecniche neutroniche, inizialmente impiegate nel settore della fisica di base, hanno acquisito un'importanza sempre più rilevante nel campo della scienza dei materiali. Il loro possibile utilizzo in indagini non distruttive le ha rese uno strumento sempre più allettante per diagnostiche su beni culturali di natura diversa [1].** I neutroni sono infatti in grado di penetrare strati profondi di materiale, a seconda della loro energia, senza subire una significativa attenuazione lungo il percorso. Questa caratteristica rende i neutroni ideali per studiare e visualizzare l'in-

tero artefatto, ottenendo così informazioni su reperti il cui interno è di difficile accesso, come il contenuto di vasi e anfore o la struttura interna di sculture e oggetti di diversa natura.

**Negli ultimi anni il numero di tecniche neutroniche applicate al campo dei beni culturali è cresciuto enormemente e numerosi sono stati gli sforzi internazionali per sviluppare postazioni per misure dedicate nelle large-scale facility diffuse in Europa e nel mondo, costruite per la produzione e l'utilizzo dei neutroni.**

ENEA supporta ormai da anni la ricerca nell'ambito dello sviluppo di tecnologie per i beni culturali e sta valutando anche l'opportunità di dotare il territorio della regione Lazio di un impianto adatto per l'applicazione di tecniche neutroniche nel campo dei beni culturali. In particolare queste finalità sono state uno degli obiettivi del **progetto ADAMO** (Tecnologie di Analisi, Diagnostica e Monitoraggio per la conservazione e il restauro di



beni culturali, <http://progettoadamo.enea.it/>), finanziato dalla Regione nell'ambito del Distretto Tecnologico Beni e Attività Culturali – Centro di Eccellenza DTC.

Tra le sorgenti di neutroni presenti sul territorio, il Frascati Neutron Generator (FNG) rappresenta uno degli impianti di maggiore interesse per lo sviluppo di diagnostiche basate sull'utilizzo di neutroni veloci [2]. FNG è, infatti, un generatore di neutroni a 14 MeV progettato e messo a punto nel Centro Ricerche di Frascati dell'ENEA per attività di ricerca nel campo della neutronica.

Il fascio di neutroni di energia 14 MeV e intensità fino a  $10^{11} \text{ s}^{-1}$  viene prodotto mediante la reazione di fusione

deuterio-trizio, realizzata attraverso un acceleratore lineare di deutoni ionizzati incidenti su un bersaglio di metallo contenente trizio. Gli sviluppi

successivi di FNG hanno consentito di estendere sensibilmente lo spettro dei neutroni anche alle basse energie, arrivando fino a 2.5 MeV con un'intensità

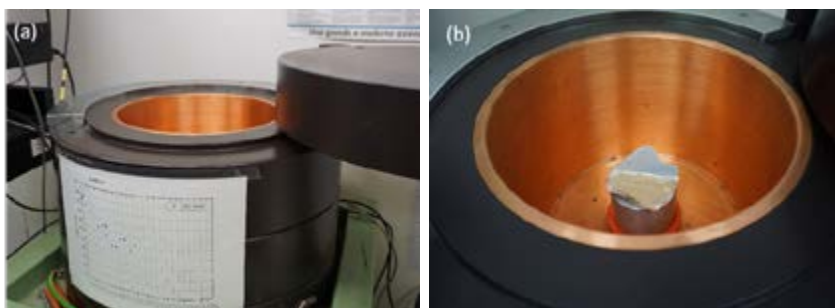


Fig. 1 (a) Pozzetto in piombo dove alloggia il rivelatore al germanio HPGe utilizzato per l'acquisizione degli spettri di decadimento gamma dopo l'irraggiamento con neutroni presso FNG. (b) Frammento di affresco romano proveniente dalla Villa della Piscina (RM) posizionato nel pozzetto in piombo dopo l'irraggiamento con neutroni di energia 14 MeV.

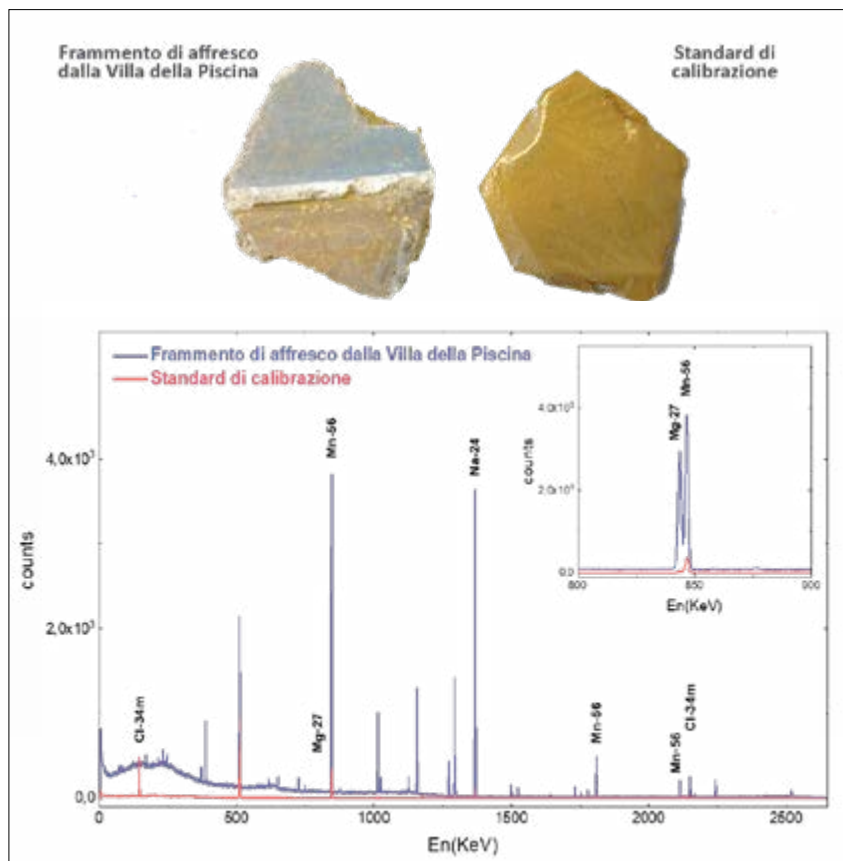


Fig. 2 Spettri gamma del frammento di affresco dalla Villa della Piscina (RM) e dello standard di calibrazione misurati dal rivelatore al germanio HPGe per un tempo di acquisizione pari a 700 s. Inset: Ingrandimento nella regione tra 800 e 900 keV sui picchi del  $^{56}\text{Mn}$  e del  $^{27}\text{Mg}$  che confermano, rispettivamente, la presenza di Fe, attribuibile all'ocra gialla, e Al.

di  $10^9 \text{ s}^{-1}$  utilizzando la reazione di fusione deuterio-deuterio.

Le caratteristiche di FNG mettono in evidenza le sue potenzialità per la caratterizzazione di materiali attraverso analisi per attivazione neutronica (NAA, Neutron Activation Analysis), una delle tecniche fondamentali per l'analisi qualitativa e quantitativa degli elementi in tracce [3]. Basata sull'interazione neutrone-nucleo per la produzione di isotopi radioattivi, tale tecnica permette di determinare le concentrazioni elementari in un campione misurando la radioattività indotta. I neutroni incidenti vengono infatti assorbiti da nuclidi bersaglio,

producendo isotopi radioattivi che decadono con emissione di particelle beta e/o raggi gamma (nuclidi figli). Nel passaggio allo stato fondamentale i nuclei figli emettono molto frequentemente raggi gamma, la cui identificazione e misura permette di determinare il tipo e la quantità di elementi nei campioni irraggiati.

Nel campo dei beni culturali l'analisi per attivazione neutronica rappresenta una delle tecniche di base per l'analisi di routine di elementi come Fe, Au, Mg, Al, Si, Cl, Ca, Co, Ni, Na, K. Lo studio degli elementi in tracce è infatti di fondamentale importanza per individuare la provenienza

dei materiali utilizzati per i pigmenti dei manufatti e ricostruire la rete di relazioni tra le popolazioni. Inoltre, l'analisi per attivazione neutronica è una delle poche tecniche in grado di superare uno dei limiti principali delle diagnostiche fino ad ora messe in campo: l'impossibilità di ottenere informazioni quantitative sugli elementi presenti in ciascun pigmento.

L'analisi per attivazione neutronica permette infatti analisi dei materiali in profondità, tipicamente contenuti in recipienti chiusi, è sensibile anche ad elementi leggeri, permettendo quindi l'identificazione anche di materiali organici, e fornisce dati quantitativi dal confronto con standard di riferimento di cui sia nota la composizione.

### I test con Fast Neutron Activation Analysis

Nel 2019 la sorgente di neutroni FNG è stata protagonista dei primi test di fattibilità per l'utilizzo di neutroni veloci per lo studio di beni di interesse culturale. I test hanno permesso di evidenziarne punti di forza e eventuali criticità con l'obiettivo di definire i requisiti di una facility per lo sviluppo di diagnostiche basate su Fast Neutron Activation Analysis (FNAA) [4]. Le caratteristiche della sorgente, insieme a quelle del rivelatore dei raggi gamma di decadimento utilizzato negli esperimenti, hanno imposto la scelta di campioni con alcune proprietà fondamentali. L'utilizzo di neutroni veloci a 14 MeV e l'impossibilità di selezionare la zona di indagine può rendere infatti piuttosto complessa l'analisi degli spettri gamma, ma selezionare campioni di dimensioni ridotte e con un numero limitato di pigmenti caratteristici rende relativamente semplice il confronto con uno standard di riferimento.

Il primo test è stato effettuato su un campione di riferimento preparato presso ENEA e INFN Frascati stendendo uno dei pigmenti puri

caratteristici dei reperti da studiare, l'ocra rossa (pigmento a base di ferro derivato da ematite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), su un supporto di intonachino ( $\text{CaCO}_3(\text{OH})_2$ ). Dopo irraggiamento con neutroni a 14 MeV per 3600 s, il campione è stato posizionato all'interno di un pozzetto in piombo ad una distanza di 10 cm dal rivelatore al germanio iperpuro HPGe (Figura 1(a)) e gli spettri gamma sono stati raccolti con tempi di acquisizione consecutivi per monitorare la presenza di radionuclidi con tempi di dimezzamento diversi.

Grazie a queste prime misure è stato definito un protocollo di misura essenziale per lo sviluppo di diagnostiche applicate ai beni culturali: informazioni quantitative possono infatti essere ottenute solo irraggiando contemporaneamente un frammento di affresco e il relativo standard di riferimento in modo da garantire l'utilizzo di un fascio di neutroni nelle stesse condizioni di energia e flusso/tempo, così da permettere il confronto diretto tra le aree dei picchi degli spettri gamma raccolti dal rivelatore al germanio.

Un frammento di affresco romano proveniente da uno dei siti archeolo-

gici di maggior interesse nell'ambito del progetto ADAMO, la Villa della Piscina di Centocelle (RM), è stato quindi irraggiato simultaneamente con lo standard di calibrazione ottenuto da due dei pigmenti puri caratteristici del campione, l'ocra gialla ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e il blu egizio ( $\text{CaCuSi}_4\text{O}_{10}$  o  $\text{CaOCuO}(\text{SiO}_2)_4$ ) [5] ed è stato posizionato all'interno del pozzetto in piombo ad una distanza di 10 cm dal rivelatore al germanio HPGe (Figura 1(b)).

Gli spettri gamma così raccolti, mostrati in Figura 2, hanno confermato con certezza la presenza di Fe, sia nel frammento di affresco che nello standard di riferimento, segnalata dalla formazione del  $^{56}\text{Mn}$ , mettendo in evidenza la possibilità, non scontata, di rivelarne la traccia tramite FNAA. Inoltre attraverso FNAA è stata rivelata anche la presenza di altri elementi: la formazione di  $^{27}\text{Mg}$  con un tempo di dimezzamento breve (circa 9 minuti) indica con grande probabilità la presenza di Al sia nel campione che nello standard di riferimento, confermata anche dalla formazione del  $^{24}\text{Na}$ , mentre il  $^{24}\text{Cl}$  che osserviamo nello spettro dello standard è con tutta probabilità dovuto

allo strato di PVC ( $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$ ) utilizzato come substrato per il pigmento. I test di fattibilità condotti hanno quindi messo in luce alcune potenzialità interessanti dell'acceleratore e hanno permesso di identificare, per la prima volta su FNG, un protocollo dedicato per misure di attivazione con neutroni veloci che preveda l'analisi preliminare sul campione, la preparazione di standard di riferimento e l'irraggiamento simultaneo del campione e del relativo standard. La presenza di elementi come Fe, Mg, Al, Na e Cl è stata confermata attraverso Fast Neutron Activation Analysis aprendo la strada ad ulteriori sviluppi che possano permettere una stima quantitativa e immediata di ciascun elemento attraverso il confronto tra il campione e il suo riferimento.

### Ringraziamenti

Si ringrazia la Sovrintendenza capitolina per la disponibilità del campione di affresco esaminato.

*Per info: [valentina.nigro@enea.it](mailto:valentina.nigro@enea.it)*

### BIBLIOGRAFIA

1. N. Kardjilov et al., Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage, Springer, Cham (2017)
2. S. Fiore et al., The Frascati Neutron Generator: Present activities and future upgrades, IEEE NSS/MIC/RTSD, 1-3 (2016).
3. M. D. Glascock et al., Neutron activation analysis and provenance research in archaeology, Meas. Sci. Technol. 14, 1516 (2003)
4. R.F. Coleman, The determination of trace elements by fast-neutron activation analysis, Analyst, 86, 39-44 (1961)
5. L. Pronti et al., Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 31, 2, 485-493 (2020)



ENEA

Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati

NEL PROSSIMO NUMERO PARLEREMO DI:

## L'Italia alla sfida del PNRR

Nel giugno dello scorso anno la Commissione europea ha approvato il PNRR, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza italiano, il documento di programmazione e spesa richiesto ai Paesi membri per poter accedere agli 800 milioni di euro di previsti per rilanciare la crescita nella fase post pandemia. A un anno di distanza si apre la fase dell'attuazione degli investimenti che ha come posta in gioco una transizione ecologica sostenibile, giusta ed inclusiva.

In questo contesto l'ENEA - come istituzione di ricerca pubblica specializzata nei temi dell'energia, dell'ambiente e dell'innovazione - ha organizzato il 28 e il 29 marzo 2022 il corso online "Rivoluzione verde e transizione ecologica - Obiettivi green, caro energia, innovazione e informazione", nell'ambito delle attività di formazione per i media in collaborazione con l'Ordine Nazionale dei Giornalisti.

In particolare, sono state approfondite le quattro componenti della Missione 2 del PNRR: Economia circolare e agricoltura sostenibile; Tutela del territorio e della risorsa idrica; Energia rinnovabile, idrogeno, rete, mobilità sostenibile; Efficienza energetica per un'edilizia sostenibile, con focus specifici sugli scenari energetici e sul ruolo fondamentale della comunicazione e dell'informazione.

Tenuto conto dell'attualità e del rilievo di queste tematiche, abbiamo deciso di dedicare un numero doppio della rivista a questa iniziativa che ha coinvolto in modo trasversale ricercatori dell'ENEA, rappresentanti delle istituzioni europee, esperti, divulgatori e giornalisti per mettere a fuoco insieme sfide, obiettivi, opportunità e criticità nel percorso verso la transizione ecologica.

[eai.enea.it](http://eai.enea.it)

