

WORKSHOP

Ricerca, sviluppo e applicazioni per i Beni Culturali

Dai risultati del progetto VADUS alle future collaborazioni

CENTRO RICERCHE ENEA FRASCATI

9-10 MAY 2023



BOOK OF ABSTRACT

Workshop

Ricerca, sviluppo e applicazioni per i Beni Culturali

Dai risultati del progetto VADUS alle future collaborazioni

CENTRO RICERCHE ENEA FRASCATI

9-10 MAGGIO 2023

A CURA DI:

Caneve, D'Amato, Spizzichino

Comitato organizzatore:

Caneve, Ciaffi, Cimino, Colao, D'Amato, De Dominicis, Spizzichino

Comitato tecnico-Scientifico:

Caneve, Colao, D'Amato, Spizzichino

Progetto grafico:

Miglietta

Si ringraziano le unità REL-EVENTI e REL-PROM per il supporto dato nell'organizzazione del workshop

Questo volume raccoglie le memorie del workshop “Ricerca, sviluppo e applicazioni per i Beni Culturali. Dai risultati del progetto VADUS alle future collaborazioni” che si è svolto a Frascati il 9 e il 10 maggio 2023 e rappresenta un ottimo strumento di divulgazione per i progetti e le attività in corso in ENEA sul tema della salvaguardia, tutela e cura del patrimonio culturale. Sono qui, quindi, presentate le soluzioni tecnologiche innovative, i prototipi high-tech e le infrastrutture di eccellenza che l’Agenzia mette a disposizione di musei, soprintendenze, istituzioni culturali e piccole e medie imprese per la diagnostica, la conservazione e la valorizzazione del patrimonio culturale e paesaggistico italiano.

Con questo volume si vuole mettere a fattore comune il lavoro portato avanti da tutti i dipartimenti ENEA a beneficio sia del processo di comunicazione e collaborazione interna che dell’avvio di azioni sinergiche per affrontare nuove sfide e per la preparazione di nuovi percorsi progettuali competitivi da proporre a livello nazionale ed europeo.

L’entusiastica partecipazione e il contributo di tutti i colleghi hanno permesso di arrivare al successo dell’evento e alla realizzazione di questo volume e, pertanto, a loro vanno i più sentiti ringraziamenti. Ai quali si aggiungono quelli rivolti ai numerosi ospiti e alle prestigiose istituzioni che sono intervenute alla discussione, avviando nuovi interessanti canali di comunicazione e collaborazione. Tra questi, il Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia, Il Museo Egizio di Torino, il Parco Archeologico di Ostia Antica, la Soprintendenza per la provincia di Viterbo e l’Etruria meridionale.

This volume collects the proceedings of the workshop “Research, development and applications for Cultural Heritage. From the results of the VADUS project to future collaborations”, which took place in Frascati on 9 and 10 May 2023, and represents an excellent dissemination tool for the projects and ongoing activities in ENEA regarding safeguard, protection, and conservation of cultural heritage. The innovative technological solutions, high-tech prototypes, and excellent infrastructures that the Agency makes available to museums, superintendencies, cultural institutions and small and medium-sized enterprises for the diagnostics, conservation and enhancement of the Italian cultural and landscape heritage are presented here.

With this volume we want to share the works carried out by all ENEA departments for the implementation of internal communication and collaboration process and for the promotion of cooperative actions to face new challenges and for the preparation of new competitive project to be proposed at national and European level. The enthusiastic participation and the contribution of all colleagues made possible the success of the event and the creation of this volume and, therefore, our heartfelt thanks go to them. Sincere thanks are also addressed to numerous guests and prestigious institutions that took part in the discussion, launching new interesting channels of communication and collaboration. These include the National Etruscan Museum of Villa Giulia, the Egyptian Museum of Turin, the Archaeological Park of Ostia Antica, the Superintendence for the Province of Viterbo and Southern Etruria.

Caneve, D’Amato, Spizzichino

Sommario

ATTIVITA' ENEA PER I BENI CULTURALI IN AMBITI PROGETTUALI	7
• La sensoristica laser del Laboratorio DIM nel progetto VADUS Valeria Spizzichino	8
• Strumenti intelligenti per supportare la resilienza e l'adattamento ai cambiamenti climatici nei centri storici Sonia Giovinazzi	10
• BIONANOinLEGNO - INnovazioni BIO e NANOtecnologiche nel de-restauro, conservazione e restauro sostenibile dei Manufatti in LEGNO dei Beni Culturali Flavia Tasso	12
• Tecnologie innovative per la protezione degli oggetti d'arte dalle vibrazioni sismiche e indotte dal traffico: il progetto MONALISA Maria Aurora Vincenti	14
• Diapason: uno scanner 3D multispettrale ad alta risoluzione per la visione di caratteristiche visibili e non visibili nel campo dei Beni Culturali Massimiliano Guarneri	16
• Efficienza energetica negli edifici storici. Casi studio nel Parco Archeologico dell'Appia Antica Silvia Di Turi	18
• La facility di irraggiamento gamma Calliope per i Beni Culturali: le sfide del progetto PERGAMO Ilaria Di Sarcina	20
• Nanomateriali per i Beni Culturali: soluzioni all'avanguardia per i danni del tempo Rosaria D'Amato	22
TECNOLOGIE ENEA PER I BENI CULTURALI: SOLUZIONI PER LE PROBLEMATICHE STRUTTURALI	24
• Tecnologie in fibra ottica per il monitoraggio strutturale permanente Michele Caponero	25
• L'infrastruttura ICT dell'ENEA per i Beni Culturali: dal digital twin all'analisi strutturale Maria Luisa Mongelli	27
• Protezione sismica dei beni architettonici Bruno Carpani	29
• Applicazioni del moto magnificato ai beni culturali Vincenzo Fioriti	31
• Studio delle vibrazioni e sperimentazione su tavola vibrante per la protezione dei beni culturali Ivan Roselli	32
• Modellazione e analisi strutturale per la salvaguardia dei Beni Culturali Fernando Saitta	34
• L'analisi vibrazionale sperimentale nella salvaguardia dei beni culturali Paolo Clemente	36
• Attivita' sui controlli non distruttivi (CND) e sviluppo e realizzazione di software dedicati ai CND per la conservazione dei beni culturali Angelo Tati	38
TECNOLOGIE ENEA PER I BENI CULTURALI: LA CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI	40
• Utilizzo della radiazione Terahertz per l'analisi e la conservazione dei beni culturali Emilio Giovenale	41
• La spettroscopia Raman con scansione di superficie: un protocollo diagnostico non-invasivo per la cura, il trattamento e la conservazione di beni archivistici e librari. Sabina Botti	43
• Analisi microstrutturali con approccio micro- e non distruttivo Daniele Mirabile	45

• Studio dei dipinti mediante tecniche non distruttive. Due esempi particolari relativi all'impiego dell'XRF	47
Claudio Seccaroni	
• Applicazioni della spettroscopia Raman nel campo dei Beni Culturali	49
Adriana Puiu	
• Diagnostica del legno antico in opera e in laboratorio	51
Anna Marzo	
• Caratterizzazione di materiali e pigmenti mediante SEM	53
Giuseppe Marghella	
• Caratterizzazione dei materiali dei Beni Culturali mediante fluorescenza indotta da laser(LIF)	55
Luisa Caneve	
ATTIVITA' ENEA PER I BENI CULTURALI	57
• Strategie e strumenti per la gestione e valorizzazione integrata del patrimonio archeologico in aree urbane periferiche	58
Beatrice Calosso	
• Idrogel per la microestrazione di coloranti da substrati pittorici e tessili	60
Valentina Nigro	
• RGB-ITR e IR-ITR: due prototipi di laser scanner per la fruizione, lo studio, il monitoraggio e la diagnostica dei Beni Culturali	62
Massimo Francucci	
ENEA ACTIVITIES FOR CULTURAL HERITAGE IN PROJECT FRAMEWORKS	64
• Laser sensors of DIM Laboratory in the VADUS project	65
Valeria Spizzichino	
• Smart tools to support resilience and climate change adaptation in historic centres	67
Sonia Giovinazzi	
• BIONANOinLEGNO: Bio and Nanotechnological innovations in the de-restoration, conservation and sustainable restoration of historical wooden artifacts	69
Flavia Tasso	
• Innovative technologies for protecting art objects from seismic and traffic-induced vibrations: the MONALISA project	71
Maria Aurora Vincenti	
• Diapason: a high-resolution multispectral 3D scanner for revealing visible and non-visible features in the field of Cultural Heritage	73
Massimiliano Guarneri	
• Energy efficiency in the historical buildings. Case studies in the Archeological Park of the Appia Antica	75
Silvia Di Turi	
• Calliope gamma irradiation facility for Cultural Heritage: the PERGAMO project challenges	77
Ilaria Di Sarcina	
• Nanomaterials for Cultural Heritage: cutting-edge solutions for age deterioration of stone monuments	79
Rosaria D'Amato	
ENEA TECHNOLOGIES FOR CULTURAL HERITAGE: SOLUTIONS FOR STRUCTURAL PROBLEMS	81
• Fiber optic technologies for structural permanent monitoring	82
Michele Caponero	
• The ICT infrastructure of ENEA for Cultural Heritage: from digital twin to structural analysis	84
Maria Luisa Mongelli	
• Seismic Protection of Architectural Heritage	86
Bruno Carpani	

• Applications of motion magnification to the cultural heritage	88
Vincenzo Fioriti	
• Study of vibrations and shaking table experimentation for the protection of cultural heritage	89
Ivan Roselli	
• Structural Analysis and Modelling for the Conservation of Cultural Heritage	91
Fernando Saitta	
• Experimental vibration analysis in the preservation of cultural heritage	93
Paolo Clemente	
• Activities on non-destructive testing (NDT) and development and creation of software dedicated to NDT for the conservation of cultural heritage	95
Angelo Tati	
ENEA TECHNOLOGIES FOR CULTURAL HERITAGE: MATERIAL CHARACTERIZATION	97
• Use of the Terahertz radiation for cultural heritage analysis and conservation	98
Emilio Giovenale	
• Surface scanning Raman spectroscopy: a non-invasive diagnostic protocol for the care, treatment and conservation of paper.	100
Sabina Botti	
• Microstructural analysis with a micro- and non-destructive approach	102
Daniele Mirabile	
• Study of paintings using non-destructive techniques. Two case studies related to the use of XRF	104
Claudio Seccaroni	
• Applications of Raman Spectroscopy in the field of Cultural Heritage	106
Adriana Puiu	
• Diagnoses of ancient timber elements in situ and in laboratory	108
Anna Marzo	
• Characterisation of samples from Cultural Heritage by SEM	110
Giuseppe Marghella	
• Characterization of cultural heritage materials by Laser Induced Fluorescence (LIF)	111
Luisa Caneve	
ENEA ACTIVITIES FOR CULTURAL HERITAGE	113
• Strategies and tools for the management and integrated enhancement of archaeological heritage in suburbs	114
Beatrice Calosso	
• Hydrogels for dye micro-extraction from paintings and textiles	116
Valentina Nigro	
• RGB-ITR and IR-ITR: two laser scanner prototypes for fruition, study, monitoring and diagnostics of Cultural Heritage	118
Massimo Francucci	

ATTIVITA' ENEA PER I BENI CULTURALI IN AMBITI PROGETTUALI

La sensoristica laser del Laboratorio DIM nel progetto VADUS

V. Spizzichino, L. Caneve, M. Francucci, M. Guarneri

ENEA - C.R. Frascati - FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: valeria.spizzichino@enea.it

Keywords: Fluorescenza indotta da laser, ricostruzione 3D, fruizione virtuale, NDT

1. Introduzione

Il progetto VADUS propone una metodologia innovativa per la fruizione virtuale 3D di beni culturali non accessibili, rivelando anche aspetti non visibili ad occhio nudo, basata sull'integrazione di tecnologie 5G, Cloud, servizi satellitari, fotogrammetria e informazioni multimediali. Al progetto, coordinato da Next-Ingegneria dei Sistemi e cofinanziato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA), partecipano ENEA, Università Sapienza di Roma, parchi Archeologico del Colosseo e di Ostia Antica, Museo Pietro Micca di Torino, TIM. Nell'ambito del progetto, sono state realizzate le visite virtuali alla Casa di Diana a Ostia Antica, all'Aula Isiaca nel Parco del Colosseo e al forte "Pastiss" nel Museo Pietro Micca di Torino.

Nell'ambito di VADUS, ENEA con il Laboratorio di Diagnostica e Metrologia (DIM), ha messo a disposizione i sistemi prototipali RGB-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar) [1], IR-ITR (Infra Red Imaging Topological Radar) [2], LIF (Laser Induced Fluorescence) di immagine (FORLAB) [3]. Tali sistemi, lavorando in modo combinato, hanno fornito rappresentazioni 3D e 2D compatibili e sovrapponibili, in grado di dare informazioni quantitative e qualitative multi-livello su struttura e difetti, colori, composizione chimica superficiale, dettagli nascosti da strati successivi.

2. I risultati ENEA per VADUS

I siti oggetto del progetto VADUS, presentando problematiche diagnostiche e di fruizione molto differenti tra loro, hanno permesso di dimostrare le capacità dei prototipi ENEA nel caso di contesti ed applicazioni diversi. In particolare, per il Museo Pietro Micca, i dati derivanti dai sistemi IR-ITR e LIF hanno arricchito la visita virtuale del forte Pastiss, non visitabile, con i risultati delle analisi sui quadri della pinacoteca, rivelando particolari invisibili a occhio nudo o scomparsi, come uno stemma e delle iniziali e caratterizzando i pigmenti bianchi utilizzati su differenti opere (figura 1).



Figura 1: Immagine fotografica di una delle opere del Museo Pietro Micca, con in basso un dettaglio dei risultati delle indagini IR-ITR che fanno comparire delle iniziali. All'opera sono sovrapposti anche i risultati delle indagini LIF: le aree chiare/luminose corrispondono alle zone dove è presente il pigmento bianco San Giovanni.

Per la Casa di Diana del Parco Archeologico di Ostia Antica, anch'essa chiusa al pubblico, è stata realizzata invece una visita virtuale dei vari ambienti in cui i livelli multimediali creati da ENEA restituiscono informazioni sulle diverse fasi costruttive e di restauro dell'edificio, grazie sia alle informazioni di carattere chimico che a quelle di carattere strutturale ottenute con i sistemi LIF e RGB-ITR e combinate tra loro. Per l'Aula Isiaca del Parco del Colosseo si è lavorato ad un'applicazione di carattere completamente differente: il 3D a colori nativi ed alta definizione (RGB-ITR) dell'apparato decorativo recuperato e conservato in un ambiente museale, ha permesso di "ricollocare" virtualmente l'affresco negli spazi originali, di cui è stato realizzato un modello 3D fotogrammetrico dai partner di progetto. Tale lavoro permette, così, di visitare l'Aula Isiaca nella sua forma originaria risalente a circa duemila anni fa.

3. Conclusioni

Il progetto VADUS ha permesso di dimostrare come le tecnologie del Laboratorio DIM usate singolarmente o in combinazione possano rispondere a svariate esigenze diagnostiche e di fruizione, sia degli addetti ai lavori (come restauratori, storici dell'arte, archeologi) che di un più ampio pubblico. La messa in evidenza di caratteristiche non visibili ad occhio nudo, in quanto nascoste da strati più superficiali o da forme di degrado o in perché di natura chimica, combinata a modelli 3D con colori nativi forniscono, così, uno strumento di analisi e di fruizione innovativa di grande valore.

4. Bibliografia

1. M. Guarneri, L. De Dominicis, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, A. Danielis, A. Mencattini. Imaging topological radar technology as a general purpose instrument for remote colorimetric assessment, structural security, cataloguing, and dissemination', *Studies in Conservation*, (2015), 60(sup1), pp. S134–S142. doi: 10.1179/0039363015Z.000000000218.
2. S. Ceccarelli, M. Guarneri, N. Orazi, M. Francucci, M. Ciaffi, F. Mercuri, M. Ferri de Collibus, U. Zammit, F. Petrucci, "Remote and contactless infrared imaging techniques for stratigraphical investigations in painting on canvas", *Applied Physics B* 127, Number 106 (2021), 13 pages, <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07654-1>.
3. V. Spizzichino, L. Caneve, F. Colao. Stand-Off Device for Plastic Debris Recognition in Post-Blast Scenarios. *Challenges* (2016), 7(2), 23; doi: 10.3390/challe7020023

Strumenti intelligenti per supportare la resilienza e l'adattamento ai cambiamenti climatici nei centri storici

S. Giovinazzi, M.L. Villani

ENEA, C.R. Casaccia, TERIN-SEN-APIC

Corresponding author: sonia.giovinazzi@enea.it

Keywords: resilienza urbana; eredità culturale; rappresentazione della conoscenza; sistema d'informazione geografica; rischio sismico; cambiamento climatico

1. Introduzione

Le aree storiche sono estremamente vulnerabili ai rischi naturali indotti dai cambiamenti climatici e ad altri rischi come terremoti e smottamenti. L'ENEA, nell'ambito del progetto finanziato dall'Unione Europea ARCH *Advancing Resilience of Historical Areas Against Climate-lated and other Hazards*, in collaborazione con diversi partner internazionali e nazionali, tra cui l'INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, e l'Università di Camerino ha realizzato strumenti e servizi intelligenti di facile utilizzo, utili e leggibili per supportare la resilienza delle aree storiche.

2. Una selezione di strumenti ARCH

CEN Workshop Agreement CWA 17727:2022 [1] fornisce una “Guida allo sviluppo della resilienza delle città per la gestione del rischio di catastrofi e l'adattamento ai cambiamenti climatici - Aree storiche”.

ARCH THIS, *Threats and Hazard Information System* [2] consente agli utenti finali di accedere a informazioni sui pericoli e dati georeferenziate sia statici (ad esempio, dati climatici storici e futuri, fonti sismogeniche, terremoti storici) che acquisiti in tempo reale (ad esempio, dati sulla qualità dell'aria e sull'ambiente provenienti da sensori già disponibili; dati in tempo reale dalla Rete Sismica Nazionale Italiana e dalla Rete Sismica Urbana di Camerino).

ARCH HARIS, *Historic Area Information System* [3] consente agli utenti finali di accedere a dati 2D e 3D georeferenziati e a informazioni sul bene esposto e sulla sua vulnerabilità (ad esempio, caratterizzazione meccanica e chimica dei materiali da costruzione; indici di vulnerabilità).

ARCH DSS, *Decision Support System* (Figura 1) [4] consente la visualizzazione intuitiva, attraverso cruscotti, di scenari di impatto per diversi pericoli e per diverse strategie di intervento e mitigazione. I possibili impatti sono misurati con indicatori in linea con la norma ISO 37123 [5], quantificando le conseguenze su: i) persone (senz'altro, potenzialmente feriti e morti); ii) danni fisici agli edifici espressi come livelli di danno; iii) perdite economiche; iv) conseguenze sulle opere d'arte, in termini di perdita di valore del patrimonio e di fruibilità; iii) perdite economiche dirette.

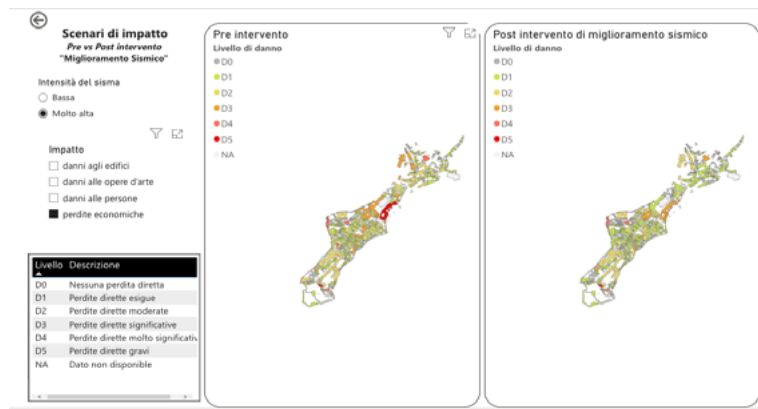


Figure 1: ARCH DSS scenari di impatto prima e dopo gli interventi

3. Conclusioni

La transizione digitale in corso rappresenta un'opportunità senza precedenti per migliorare la resilienza delle aree storiche e del patrimonio culturale ai rischi naturali grazie alla disponibilità di sensori a basso costo, tecnologie collaborative intelligenti, piattaforme interoperabili, algoritmi e applicazioni di scienza aperta. Questo lavoro ha presentato alcuni strumenti e servizi per i decisori e la comunità più ampia a sostegno del miglioramento della resilienza delle aree storiche. Questi strumenti democratizzano l'accesso a dati, informazioni e know-how sui possibili impatti che diversi rischi naturali potrebbero indurre su diversi elementi esposti all'interno di aree storiche, nonché sulle opportunità di implementare strategie di resilienza per mitigare gli impatti, adattarsi alle minacce a lungo termine e per riprendersi tempestivamente e prosperare all'indomani degli eventi di crisi.

4. Riferimenti Bibliografici

- 1) CWA 17727:2022. City Resilience Development-Guide to Combine Disaster Risk Management and Climate Change Adaptation-Historic Areas. Available online: <https://store.uni.com/en/uni-cwa-17727-2022> (Accessed 28/08/2023).
- 2) Costanzo, A.; Falcone, S.; D'Alessandro, A.; Vitale, G.; Giovinazzi, S.; Morici, M.; Dall'Asta, A.; Buongiorno, M.F. A Technological System for Post-Earthquake Damage Scenarios Based on the Monitoring by Means of an Urban Seismic Network. *Sensors* 2021, 21, 7887. <https://doi.org/10.3390/s21237887>
- 3) Giovinazzi, S.; Marchili, C.; Di Pietro, A.; Giordano, L.; Costanzo, A.; La Porta, L.; Pollino, M.; Rosato, V.; Luckeath, D.; Milde, K. Assessing earthquake impacts and monitoring resilience of historic areas: Methods for GIS tools. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021,10,461.
- 4) Villani, M.L.; Giovinazzi, S.; Costanzo, A. Co-Creating GIS-Based Dashboards to Democratize Knowledge on Urban Resilience Strategies: Experience with Camerino Municipality. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2023,12,65. <https://doi.org/10.3390/ijgi12020065>
- 5) ISO 37123:2019, Sustainable cities and communities - Indicators for resilient cities. Available online: <https://www.iso.org/standard/70428.html> last (Accessed 28/08/2023)

BIONANOinLEGNO - INnovazioni BIO e NANOTecnologiche nel de-restauro, conservazione e restauro sostenibile dei Manufatti in LEGNO dei Beni Culturali

F. Tasso¹, G. Migliore¹, C. Isca²

¹ ENEA, C.R. Casaccia, SSPT PROTER OEM

² Abapa, Accademia Belle Arti Palermo

Corresponding author: flavia.tasso@enea.it

Keywords: restauro sostenibile, biotecnologie, biopulitura, batteri, legni archeologici sommersi, legni storico-artistici

1. Abstract

Il progetto BIONANOINLEGNO ha lo scopo di valutare l'efficacia di biotecnologie e nanomateriali sostenibili ed innovativi per il de-restauro e il restauro di manufatti lignei archeologici sommersi e storico-artistici. Le tecnologie sviluppate sono basate sull'impiego di microrganismi e nanomateriali.

2. Introduzione

Per “de-restauro” si intendono le operazioni di rimozione dei materiali applicati nell'ambito di precedenti restauri, quando essi risultino danneggiare l'integrità dell'opera. I materiali tradizionalmente utilizzati nel restauro del legno hanno creato strati complessi, invecchiati e degradati che i restauratori devono rimuovere e sostituire con nuovi materiali reversibili, più sicuri per la salute degli operatori e per l'ambiente. Nel caso del legno, le alternative bio-tecnologiche finora sono inesplorate.

3. Problematiche di de-restauro

Legni archeologici sommersi: la conservazione dei legni archeologici sommersi prevede la sostituzione dell'acqua che impregna il legno con il polietilenglicole (PEG) che mantiene inalterata forma e dimensioni del reperto ma presenta effetti indesiderati, quali variazioni di colore, acidificazione e alterazione delle proprietà del legno. La sua rimozione, mediante utilizzo di alcool o acqua calda, non è mai completamente efficace. Ne deriva l'esigenza di sviluppare un metodo alternativo e sostenibile per il “de-restauro” dei legni archeologici sommersi.

Legni storico-artistici: il restauro dei legni storico-artistici è avvenuto con modalità molto diverse a seconda dell'epoca e con l'impiego di sostanze che, con il tempo, si sono rivelate dannose, dando origine a strati compositi complessi. Fra le sostanze più frequentemente impiegate e di difficile rimozione ci sono: Paraloid, Polivinilacetato (PVA) e cere.

4. Il Progetto BIONANOINLEGNO

Il progetto BIONANOINLEGNO (finanziamento RSI-DTC Lazio) ha lo scopo di valutare l'efficacia di biotecnologie e nanomateriali sostenibili ed innovativi per il de-restauro e il restauro di manufatti lignei archeologici sommersi e storico-artistici. I partecipanti sono: Università della Tuscia (DIBAF), ENEA (PROTER-OEM), Università Sapienza (Dip. Chimica), Istituto Centrale per il Restauro, Emmebi Diagnostica Artistica e WSENSE. Il laboratorio ENEA OEM coordina il workpackage “Biotecnologie” che ha lo scopo di sviluppare una soluzione biotecnologica alle problematiche di de-restauro e restauro dei legni basata sulla “biopulitura”, ovvero sull'utilizzo delle cellule microbiche per rimuovere dalle opere depositi indesiderati di diversa origine [1]. La biopulitura fornisce molti vantaggi: selettività verso il composto da rimuovere, bassa aggressività per il manufatto, minore pericolosità per gli operatori e compatibilità ambientale. Il laboratorio OEM ha affrontato un'ampia gamma di casi-studio che hanno dimostrato l'efficacia di questa tecnologia applicata a manufatti di diversa composizione e a problematiche molto variegata [2]. I ceppi batterici impiegati sono conservati nella collezione microbica ENEA-MIRRI [3] e vengono selezionati di volta in volta

sulla base della problematica da affrontare. Per la rimozione del PEG dai legni archeologici è stato selezionato un consorzio microbico capace di crescere in PEG a concentrazioni crescenti (figura 1). Attualmente sono in corso analisi chimiche per lo studio dei prodotti di degrado del PEG e analisi microbiologiche per determinare la composizione tassonomica del consorzio. Per i legni storico-artistici, sono stati selezionati dalla collezione ENEA-MIRRI due ceppi microbici capaci di degradare Paraloid, PVA e cera d'api: LAM21 *Acinetobacter* sp. e ZCONT *Rhodococcus* sp. Questi ceppi sono stati applicati inizialmente su provini di legno, rivestiti con le sostanze in esame. Successivamente, il ceppo più efficace (ZCONT) è stato applicato su un tassello del verso della tavola lignea “Madonna con Bambino” ricoperto da uno spesso strato di consolidanti (figura 2). Impacchi batterici della durata di 18 ore hanno determinato un ammorbidimento dello strato dei consolidanti che ha facilitato la successiva rimozione da parte del restauratore, con una notevole riduzione della quantità di solventi chimici impiegati.

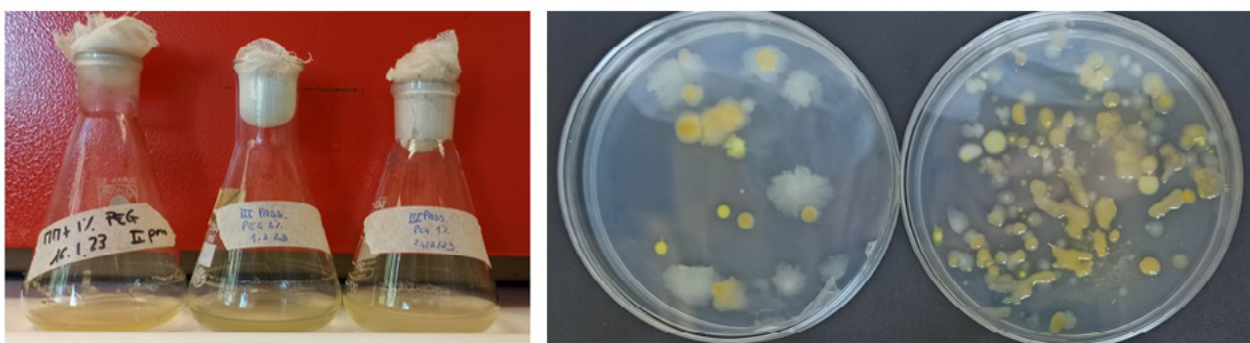


Figura 1. Tre successivi passaggi colturali in terreno contenente PEG1500 1% (p/p); piastre madri su cui si sono sviluppate le colonie batteriche dalle culture di arricchimento in PEG.

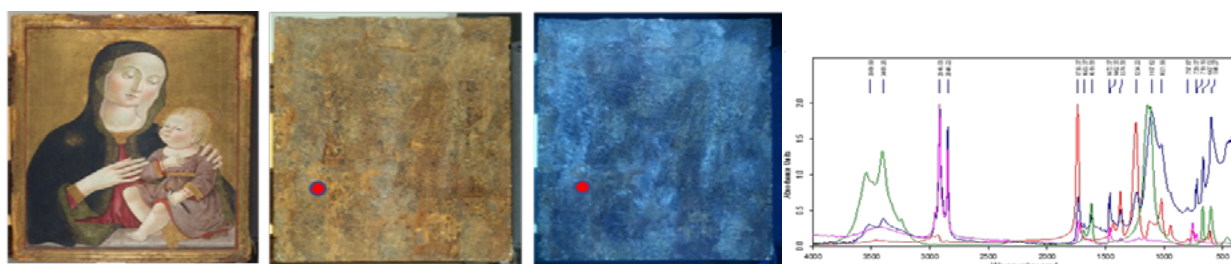


Figura 2. *Madonna con il Bambino* (Benvenuto di Giovanni) Museo Colle del Duomo, Viterbo. Esame del verso con luce visibile, radente e UV e spettro FTIR-ATR. Rosso:PVA; fucsia: cera d'api; verde: gesso.

5. Conclusioni

La sfida che il progetto BIONANOINLEGNO si pone è di sviluppare prodotti di restauro e metodologie di intervento da immettere nel mercato, ampliando le possibilità di scelta del restauratore che potrà così utilizzare prodotti innovativi, sicuri ed economici.

6. Bibliografia

1. A.R. Sprocati, C. Alisi, F. Tasso, P. Marconi, G. Migliore, Formule microbiche per l'arte. *Kermes* 100, (2018) pp. 23-26.
2. A.R. Sprocati, C. Alisi, G. Migliore, P. Marconi, F. Tasso. Sustainable restoration through biotechnological processes: a proof of concept. In “Roles of microorganisms in heritage degradation and preservation” (E. Joseph, P. Junier eds.) Springer, (2020), pp. 235-261.
3. <https://sostenibilita.enea.it/news/microbial-resource-research-infrastructure-italian-node-mirri-it>

Tecnologie innovative per la protezione degli oggetti d'arte dalle vibrazioni sismiche e indotte dal traffico: il progetto MONALISA

L. Sorrentino¹, O. AlShawa¹, M.A. Caponero², M.C. Castino³, A. Cataldo⁴, A.M. Cicalese³, V. Fioriti⁴, M. Lamonaca⁵, G. Occhipinti¹, S. Patragioni³, I. Roselli⁴, M.A. Vincenti², P. Clemente⁶

¹Sapienza Università of Roma, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica

²ENEA, C.R. Frascati, FSN-TECFIS-MNF

³Somma International

⁴ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-MET-DISPREV

⁵Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia

⁶ENEA, C.R. Casaccia, TERIN-SEN-APIC

Corresponding author: aurora.vincenti@enea.it

Keywords: Sarcofago degli Sposi, vibrazioni sismiche e da traffico, analisi modale, dispositivo di isolamento alla base, sensori di Bragg in fibra ottica

1. Introduzione

Gli oggetti d'arte iconici, elementi di attrazione turistica per i musei che li ospitano, sono spesso realizzati con materiali fragili e hanno subito danneggiamenti nel corso dei secoli. Possono inoltre essere esposti a rischi rilevanti quali i terremoti e le vibrazioni indotte da traffico. Il progetto MONALISA, finanziato dalla Regione Lazio e dal Ministero della Cultura, ha lo scopo di progettare un dispositivo di isolamento alla base per la protezione delle opere d'arte dalle vibrazioni naturali ed antropiche, integrato con un sistema di monitoraggio dinamico basato su sensori di Bragg in fibra ottica, predisposto per rivelare il superamento di soglie critiche in ampiezza e frequenza delle vibrazioni.



Figura 1: "Sarcofago degli Sposi", Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia (Roma).

2. Abstract

Come caso studio è stato considerato il “Sarcofago degli Sposi”, scultura etrusca realizzata in terracotta risalente al VI secolo a.C., conservata nel Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma (Figura 1). Mediante la tecnica Structure from Motion è stato ottenuto un modello matematico 3D del Sarcofago, sotto forma di nuvola di punti e mesh poligonale, partendo dal quale è stata realizzata una replica in polistirolo dell’opera e derivato un modello agli elementi finiti utilizzato per eseguire l’analisi modale [1]. Per la protezione e conservazione dell’opera è innanzitutto necessaria un’accurata analisi delle caratteristiche delle vibrazioni indotte dal traffico su rotaia e l’identificazione dinamica della statua all’interno della teca, mediante moto magnificato [2]. Inoltre, sulla base della caratterizzazione dell’azione sismica attesa nel sito del Museo e di modellazioni a 1 grado di libertà, con scrittura delle equazioni del moto orizzontale o verticale, e a più gradi libertà, con simulazioni numeriche agli elementi finiti, è stato progettato un dispositivo di isolamento alla base. Il sistema di isolamento e di monitoraggio è attualmente sottoposto a sperimentazione su tavola vibrante presso ENEA C.R. Casaccia.

3. Conclusioni

È stato progettato e realizzato un sistema di isolamento alla base per proteggere il Sarcofago degli Sposi dalle vibrazioni quotidiane dovute al traffico e da quelle eccezionali dovute ai terremoti. La tecnica proposta potrà essere adattata in altri contesti associati a oggetti di piccola massa e grande valore attraverso i criteri di progettazione messi a punto nell’ambito della ricerca.

4. Bibliografia

1. M.A. Vincenti, M.A. Caponero, M. Lamonaca, G. Occhipinti, O. AlShawa, L. Sorrentino, Proc. of 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2023, Athens, Greece, 12-14 June 2023.
2. V. Fioriti, A. Cataldo, I. Roselli, A. Colucci, P. Clemente, M. Lamonaca and L. Sorrentino, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 309, pp. 707-716, 2022.

Diapason: uno scanner 3D multispettrale ad alta risoluzione per la visione di caratteristiche visibili e non visibili nel campo dei Beni Culturali

M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Francucci, M. Nuvoli, M. Ciaffi

ENEA, C.R. Frascati, FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: massimiliano.guarneri@enea.it

Keywords: 3D multispectral, laser scanner, no-invasive, remote sensing

1. Introduzione

Il monitoraggio e la creazione di gemelli digitali nell'ambito dei Beni Culturali sta vivendo un periodo fiorente, soprattutto grazie all'introduzione di nuove tecnologie e algoritmi che consentono di velocizzare il processo di acquisizione, manipolazione e visualizzazione dei dati afferente al bene investigato. Il laboratorio di Diagnostica e Metrologia del Centro Ricerche ENEA di Frascati sviluppa da diversi anni dispositivi opto-elettronici prototipali nell'ambito di diversi settori, dal monitoraggio nel settore nucleare fino a quello industriale e oil&gas [1]: da questa esperienza e dall'adattamento di tali dispositivi al mondo dei Beni Culturali, è nato un nuovo prototipo di laser scanner, denominato Diapason, in grado di coniugare la generazione di gemelli digitali ad alta definizione con l'analisi multispettrale e colorimetrica a distanza.

2. Il prototipo Diapason

Come precedentemente introdotto, il laboratorio sviluppa prototipi di laser scanner 3D basati sulla modulazione di ampiezza di fasci laser combinati in grado di acquisire puntualmente informazioni colorimetriche e morfologiche dell'oggetto scansionato [2]. Da alcuni anni è stato sviluppato anche un prototipo che, grazie all'uso di una sorgente laser nel primo infrarosso, riesce ad ottenere informazioni sotto la superficie di pigmenti, ad esempio in quadri ad olio. Diapason è l'unione e l'evoluzione di queste due tecnologie, in quanto equipaggiato con sette lunghezze d'onda (355, 440, 535, 580, 660, 800, 1550 nm) consente di ottenere mappe multispettrali tridimensionali con una risoluzione massima che si aggira intorno ai 60 GPixel.

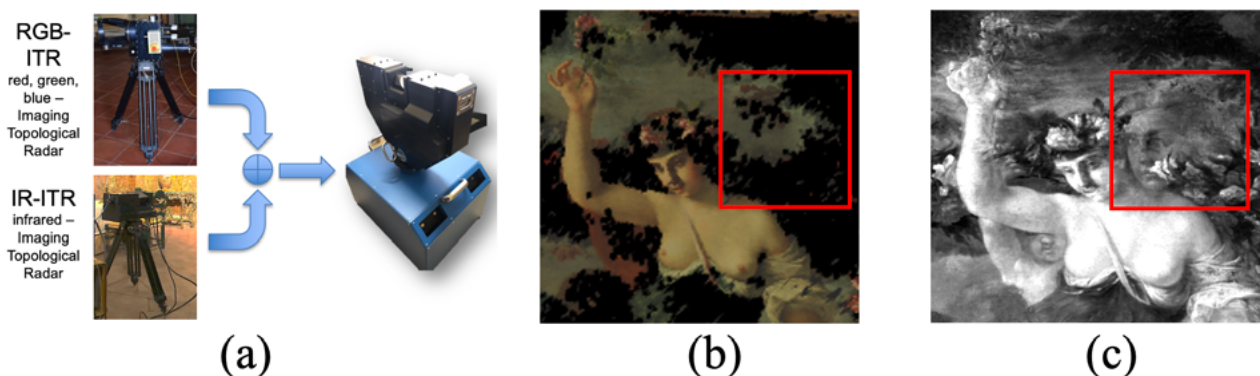


Figura 1: (a) Diapason scanner; dettaglio: (b) modello 3D a colori (RGB-ITR); (c) layer infrarosso (IR-ITR) rivela un viso non visibile in (b)

Le mappe hanno una risoluzione angolare di 0,002 gradi, che corrisponde a circa 0,250 mm alla distanza di 10 m.

3. Conclusioni

Il laser scanner multispettrale Diapason consentirà non solo di ottenere copie digitali fedeli dei beni artistici investigati, ma anche di osservare (in determinate condizioni) dettagli non visibili all'occhio umano e agevolmente eseguire operazioni matematiche sui diversi layer [3], come l'uso di algoritmi di Intelligenza Artificiale, per analisi e classificazione di dettagli pittorici o strutturali dell'opera.

4. Bibliografia

1. Guarneri, M. et al., “Imaging topological radar technology as a general purpose instrument for remote colorimetric assessment, structural security, cataloguing, and dissemination”, *Studies in Conservation*, 60 (sup1), pp. S134–S142 (2015). doi: 10.1179/0039363015Z.000000000218.
2. Ceccarelli, S. et al. ‘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, pp. 257–264 (2021). doi: 10.1016/j.culher.2020.09.002. bibliografia
3. Guarneri, M., Ceccarelli, S., Francucci, M., Ferri de Collibus, M., Ciaffi, M., Gusella, V., Liberotti, R., and La Torre, M., “Multi-Sensor Analysis for Experimental Diagnostic and Monitoring Techniques at San Bevignate Templar Church in Perugia”, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, 693–700 (2023). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-693-2023>.

Efficienza energetica negli edifici storici. Casi studio nel Parco Archeologico dell'Appia Antica

S. Di Turi, N. Calabrese, F. Caffari, G. Centi, F. Giustini, F. Margiotta, D. Palladino, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe

ENEA, C.R. Casaccia, DUEE-SPS-ESU

Corresponding author: silvia.dituri@enea.it

Keywords: efficienza energetica, edifici storici, riqualificazione energetica, consumi reali, strategie di intervento.

1. Introduzione

Ottenere elevate prestazioni energetiche negli edifici storici è un processo molto complesso. La normativa italiana in materia di efficienza energetica prevede che le costruzioni vincolate ai sensi del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio [1] vadano in deroga e non siano tenute al rispetto degli standard prestazionali previsti in caso di riqualificazioni energetiche, se gli interventi possono compromettere i caratteri storici e architettonici. Inoltre, per qualsiasi azione adottata è necessaria la preventiva autorizzazione del Ministero tramite le Soprintendenze (art.21 [1]). Ciò tuttavia non può essere un deterrente al miglioramento della prestazione energetica degli edifici storici, il cui interesse strategico è confermato nell'ambito di numerose iniziative ed azioni politiche, come ad esempio il "Piano nazionale di ripresa e resilienza"[2] e la "Renovation Wave" [3], oltre che di attività di ricerca internazionali, quali l'IEA-SHC Task 59 [4], focalizzato principalmente sulle potenzialità dell'utilizzo dell'energia solare come soluzione efficace di riqualificazione energetica in edifici storici.

2. Sintesi dell'attività di ricerca condotta

Il Dipartimento per l'Efficienza energetica di ENEA si sta occupando attualmente del tema attraverso le attività inerenti all'efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati nell'ambito di Ricerca di Sistema Elettrico [5]. La ricerca analizza alcuni complessi di edifici appartenenti al Parco Archeologico dell'Appia Antica a Roma e li utilizza come casi pilota per raggiungere le più elevate prestazioni possibili nel rispetto del valore storico e artistico. L'attività, articolata in due fasi (Figura 1), ha l'obiettivo primario di caratterizzare gli edifici analizzati dal punto di vista termofisico attraverso tecniche di indagine non invasive (ricerche documentali, termografie, termoflussimetrie, analisi dei sistemi impiantistici presenti) e stimarne i consumi reali attraverso la raccolta di bollette energetiche e dati relativi alle apparecchiature energivore presenti. A seguito di tali analisi, si valuta la prestazione energetica degli edifici attraverso simulazioni con metodo di calcolo orario e si analizzano



Figura 1: Fasi della ricerca in atto

differenti scenari di intervento sia a livello di edificio che di sito in modo da valutare l'applicabilità di strategie di miglioramento sia per l'involucro che per gli impianti e la possibilità di installare sistemi di produzione da fonti rinnovabili, nel rispetto dei vincoli esistenti.

3. Conclusioni

A conclusione, è possibile affermare che la riqualificazione energetica negli edifici storici debba essere considerata non un ostacolo, ma un incentivo alla tutela del bene e alla sua fruizione. Incrementare la prestazione energetica in tali contesti vincolati non soltanto contribuisce al raggiungimento degli obiettivi europei di un parco edilizio esistente decarbonizzato, ma favorisce l'ottenimento di livelli adeguati di efficienza e di comfort come richiesti dai moderni standard. L'obiettivo finale è quello di una visione integrata di tutti gli aspetti sia per i singoli edifici sia per l'intero sito di appartenenza in modo da favorire l'efficienza energetica a scala più ampia.

4. Bibliografia

1. D. Lgs. 42/2004 – Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, 2004; Disponibile online su: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2004;42>.
2. Piano nazionale di ripresa e resilienza – PNRR; accessibile online su: <https://www.italiadomani.gov.it/content/sogei-ng/it/it/home.html>
3. Commissione Europea; Renovation wave; accessibile online su: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
4. International Energy Agency (IEA); Solar Heating and Cooling programme (SHC), IEA SHC Task 59: Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy, Settembre 2017 - Febbraio 2021; accessibile online su <https://task59.iea-shc.org/>
5. S. Di Turi, D. Palladino, F. Caffari, G. Centi, F. Margiotta, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe, “Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: caratterizzazione di casi studio reali (LA1.4)”, Report Ricerca di Sistema Elettrico Accordo di Programma Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica – ENEA, Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024, Giugno 2023.

La facility di irraggiamento gamma Calliope per i Beni Culturali: le sfide del progetto PERGAMO

A. Cemmi¹, A. Cirigliano², I. Di Sarcina¹, B. D'Orsi¹, G. Ferrara¹, T. Rinaldi², J. Scifo¹, A. Verna¹

¹ENEA, C.R. Casaccia, FSN-FISS-SNI

²Sapienza Università di Roma – Dip. Biologia e Biotecnologie Charles Darwin

Corresponding author: ilaria.disarcina@enea.it

Keywords: radiazioni ionizzanti, disinfezione, recupero.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, l'utilizzo delle radiazioni ionizzanti per il recupero e la conservazione dei beni culturali (CH) ha fornito soluzioni alternative e più sostenibili rispetto ai metodi tradizionali. Tali radiazioni, infatti, risultano essere efficaci per l'eliminazione di insetti, funghi e muffe da artefatti di interesse artistico-culturale. Il progetto PERGAMO (RecuPero dal biodEgRado con metodoloGie fisiche e carAtterizzazione del patriMonio storico e archivistico), coordinato da ENEA e finanziato dal DTC Lazio, riguarda proprio lo sviluppo di tecniche fisiche e processi più sostenibili per il recupero e lo studio di beni culturali degradati. Per la prima volta in Italia vengono utilizzate le radiazioni ionizzanti disponibili presso gli impianti dell'ENEA per trattamenti non invasivi e per la diagnostica di manufatti di interesse artistico culturale [1].

2. Abstract

L'efficacia delle radiazioni ionizzanti nella disinfezione, consolidamento e conservazione dei CH è stata ampiamente studiata [2, 3] e, nonostante tali tecnologie siano impiegate in molti paesi, rappresentano un'assoluta novità nel panorama italiano. Il loro utilizzo permette in molti casi di evitare la perdita di manufatti degradati da agenti biodeteriogeni, consentendo di fermare il deterioramento e rendendo possibile il recupero degli oggetti da parte dei restauratori. Nonostante i molti e consolidati benefici, gli operatori dei CH dimostrano una forte resistenza all'uso delle radiazioni. Ciò è spesso dovuto all'errata conoscenza delle eventuali modifiche fisico-chimiche (*side-effects*) indotte dalle radiazioni sui materiali trattati. Pertanto, è di fondamentale importanza e scopo di PERGAMO studiare e ottimizzare i parametri di irraggiamento in modo da minimizzare questi effetti.

L'uso della radiazione gamma, disponibile presso la facility Calliope dell'ENEA Casaccia, mostra molti vantaggi rispetto alle tecniche di trattamento classiche, oltre ad essere non invasiva permette di trattare manufatti anche complessi e di grandi dimensioni. La tecnologia proposta è sicura per la salute degli operatori e, grazie alla tipologia di radiazione, il materiale irraggiato non diventa radioattivo.

In figura 1 viene mostrato un caso studio del progetto: il trattamento di alcuni volumi della Biblioteca Nazionale e Universitaria di Zagabria (NUL, Croazia). Sui libri oltre alla caratterizzazione delle proprietà chimico-fisiche è stata effettuata l'analisi microbiologica della comunità microbica prima e dopo il trattamento al fine di verificarne l'efficacia.



Figura 1: volume (1890) attaccato da biodeteriogeni (sinistra); crescita della comunità microbica prima (destra in alto) e dopo (destra in basso) il trattamento.

3. Conclusioni

Le radiazioni ionizzanti applicate per la conservazione dei beni culturali rappresentano uno strumento molto efficace per la rimozione di insetti e microorganismi. Presso la facility Calliope vengono utilizzate le radiazioni gamma per il trattamento, il recupero e la conservazione di beni culturali di interesse [4, 5].

4. Bibliografia

1. A. Cemmi, et al., “Le radiazioni ionizzanti in ‘soccorso’ dei beni culturali”, EAI bimestrale dell’ENEA Speciale - 2022; DOI 10.12910/EAI2022-032.
2. AAVV, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, IAEA Radiation Technology Series 6, 2017.
3. A. Cemmi et al., “Gamma radiation-induced effects on paper irradiated at absorbed doses common for cultural heritage preservation”, Radiation Physics and Chemistry, 202, 110452, 2022. doi: 10.1016/j.radphyschem.2022.110452
4. S. Baccaro et al., ENEA Technical Report, 2019, RT/2019/4/ENEA.
5. A. Cemmi et al., ENEA Technical Report, 2020, RT/2020/1/ENEA.

Nanomateriali per i Beni Culturali: soluzioni all'avanguardia per i danni del tempo

R. D'Amato, G. Terranova

ENEA, C.R. Frascati, FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: rosaria.damato@enea.it

Keywords: nanomateriali, stampa 3D, protettivi, materiali lapidei

1. Introduzione

Negli ultimi anni l'utilizzo dei nanomateriali ha trovato spazio nel campo della protezione e del restauro dei Beni Culturali, grazie alle loro uniche proprietà multifunzionali dovute all'elevata area superficiale e alla grande reattività chimica. Nanocompositi polimerici sono stati utilizzati sia per il restauro conservativo che per il restauro integrativo nell'ambito di due progetti finanziati dalla Regione Lazio: COLLINE (Conservazione di lapidei mediante oli essenziali e nanotecnologie) e 3DH-Solution (Soluzioni di stampa 3D per il recupero strutturale e architettonico di Beni Culturali).

2. Abstract

I due progetti citati hanno in comune l'utilizzo di nanoparticelle di materiali ceramici, sintetizzate mediante pirolisi laser. Le nanoparticelle sono SiO_2 , per le sue capacità idrofobiche, e TiO_2 , per le sue capacità biocide e fotocatalitiche, alle quali si aggiunge SiC per il progetto 3DH-solution, per le sue proprietà meccaniche.

A Frascati è presente l'impianto di pirolisi laser Lucifero (Figura 1), equipaggiato con un laser di potenza a CO_2 , che permette la sintesi di nanoparticelle a partire da reagenti in fase gassosa o in fase aerosol e grazie all'energia fornita dal laser viene indotta una reazione chimica, che avviene ad alte temperature, e si ha la formazione delle nanoparticelle volute [1]. Questo metodo di sintesi è particolarmente vantaggioso per una serie di motivi: innanzitutto ha una produttività elevata; produce nanomateriali ad elevato grado di purezza e prive di contaminazioni perché la zona di reazione è confinata da un gas inerte e lontana dalle pareti della camera di reazione; le proprietà delle nanoparticelle quali dimensioni, aggregazione e composizione chimica sono facilmente modulabili variando i parametri principali del processo come i flussi dei gas, la pressione all'interno della camera di reazione e la potenza del laser.

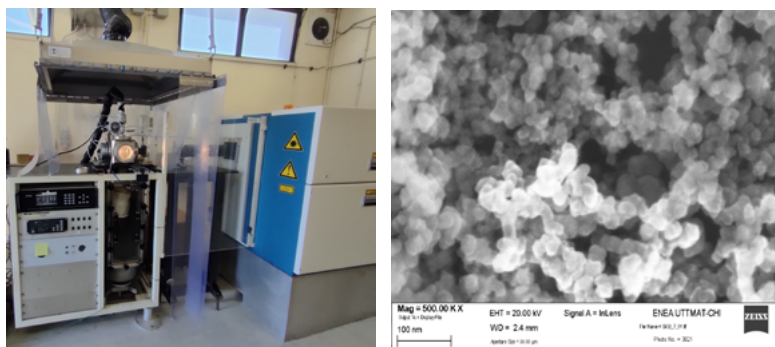


Figura 1: a sinistra foto dell'impianto Lucifero, a destra foto SEM di nanoparticelle di SiO_2

Le nanoparticelle sono poi disperse in polimeri di diversa natura a seconda dell'applicazione per cui è pensato il nanocomposito.

Nell'ambito del progetto COLLINE sono stati prodotti nanocompositi disperdendo le nanoparticelle in

polimeri silossanici commerciali per ottenere dei protettivi da applicare sulla superficie di monumenti medievali in peperino per il loro restauro conservativo. Il progetto ha previsto l'utilizzo anche di altri materiali protettivi commerciali per contrastare l'attacco biologico. I risultati dei vari trattamenti e la loro efficacia sono monitorati con diversi metodi diagnostici e mediante monitoraggio ambientale con sensori in fibra ottica appositamente realizzati.

Le nanoparticelle sono state disperse anche in polimeri come il PLA, e sono stati ottenuti dei filamenti nanocompositi utilizzati nella stampa 3D per la riproduzione di elementi architettonici o decorativi per il restauro integrativo di elementi mancanti o come duplicati per la loro fruizione o a scopo di studio, finalità del progetto 3DH-Solution. Provini ottenuti dalla stampa 3D dei filamenti nanocompositi hanno mostrato migliori proprietà meccaniche e di idrofobicità rispetto al PLA commerciale [2].

3. Conclusioni

Nanoparticelle di SiC, SiO₂ e TiO₂, sintetizzate per pirolisi laser, sono state utilizzate con ottimi risultati per migliorare le proprietà dei materiali commerciali impiegati nel restauro conservativo di beni culturali. La realizzazione di filamenti nanocompositi e la stampa 3D di elementi architettonici e decorativi apre la strada a nuovi scenari anche nel campo del restauro integrativo.

4. Bibliografia

1. R. D'Amato, M. Falconieri, S. Gagliardi, E. Popovici, E. Serra, G. Terranova, E. Borsella, "Synthesis of ceramic nanoparticles by laser pyrolysis: from research to applications", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 104, 461-469 (2013), DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.026
2. E. Mansi, G. Terranova, D. Linardi, S. Marfia, E. Monaldo, M. Ricci, M. Imbimbo, A. Pelliccio, A. Brunetin, R. D'Amato, "Development of 3D printed nanomaterials for restoration of exterior artworks", *J. Phys. Conf. Series*, 2579, 012004 (12 pag) (2023). doi:10.1088/1742-6596/2579/1/012004.

TECNOLOGIE ENEA PER I BENI CULTURALI:
SOLUZIONI PER LE PROBLEMATICHE
STRUTTURALI

Tecnologie in fibra ottica per il monitoraggio strutturale permanente

C. Mazzotta, M.A. Caponero, A. Polimadei

ENEA, C.R. Frascati, FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: cristina.mazzotta@enea.it

Keywords: Fiber Optic Sensor FOS, Fiber Bragg Grating FBG

1. Introduzione

Il laboratorio FOS dell'ENEA di Frascati può vantare una particolare competenza nella realizzazione di sensori in fibra ottica in materiali e componenti compositi. Nell'ambito dei programmi di ricerca e sviluppo finanziati da soggetti pubblici e privati, sono state raggiunte competenze e conoscenze mature nello sviluppo di tali sensori da utilizzare per il monitoraggio permanente di parametri fisici e ambientali, quali: deformazione, temperatura e umidità relativa.

2. Abstract

I sensori FBG (Fiber Bragg Grating) sono particolarmente adatti per applicazioni di monitoraggio permanente. I capolavori d'arte esposti all'aperto possono trarre vantaggio specifico da due delle caratteristiche ineguagliabili dei sensori FBG: resistenza agli agenti atmosferici e bassa invasività sia dei sensori che del cablaggio. Tra i numerosi interventi realizzati dal laboratorio FOS dell'ENEA, si riportano alcuni esempi che mostrano come sono stati realizzati progetti di monitoraggio strutturale di beni architettonici.

La statua bronzea di Bartolomeo Colleoni a Venezia

Durante i lavori di restauro sono stati installati i sensori FBG per il monitoraggio permanente di una frattura della zampa anteriore destra del cavallo, capolavoro quattrocentesco di Andrea del Verrocchio. Sulla frattura della gamba sono stati installati quattro sensori FBG: tre sensori dedicati al monitoraggio strutturale meccanico ed un sensore dedicato al monitoraggio/riferimento termico. I sensori sono stati preparati su fibra nuda e installati con resina specifica. Dopo l'indurimento della resina i sensori e la fibra sono appena visibili. Il sistema è disponibile per il monitoraggio strutturale a lungo termine rispetto all'eccitazione ambientale termica (giorno/notte, estate/inverno) e meccanica (principalmente vento).



Figura 1. Da sinistra: il monumento equestre; un particolare della fibra quasi invisibile equipaggiata col sensore; i quattro sensori posti su una gamba; esempio di segnale acquisito che mostra una deformazione transitoria.

La cattedrale di Orvieto

Un sistema di monitoraggio dell'apertura delle fessure è stato sviluppato e installato sulla grande cattedrale cattolica romana del XIV secolo di Orvieto. Si tratta di un lavoro multidisciplinare volto a valutare lo stato conservativo della cattedrale e la sua vulnerabilità sismica. I sensori installati effettuano un monitoraggio statico continuo dell'apertura delle fessure presenti nella parte alta delle pareti della navata centrale, in prossimità del transetto. Il monitoraggio mostra la correlazione tra

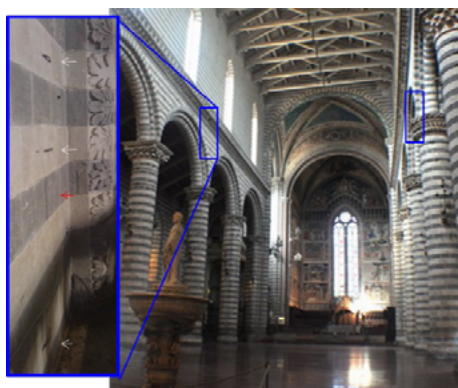


Figura 2. La navata della Cattedrale, gli inserti mostrano la posizione dell'installazione. La vista ingrandita mostra i sensori FBG, scarsamente visibili nell'intervento.

temperatura ambientale e apertura delle fessure, evidenziando sia i cicli di apertura delle fessure giorno/notte che quelli stagionali.

Le Mura Aureliane a Roma

È stato sviluppato e installato un sistema di monitoraggio sul complesso storico delle Mura Aureliane di Roma, gli attuali resti della linea di mura intorno a Roma iniziata dall'imperatore romano Aureliano nel III secolo d.C. L'attività si è svolta come indagine preliminare ai previsti lavori di restauro finalizzati alla riapertura al pubblico dei camminamenti. I sensori effettuano un monitoraggio statico continuo dell'apertura delle fessure e un monitoraggio dinamico programmato dei tiranti di rinforzo della muratura. Il sistema di monitoraggio sfrutta appieno la possibilità di collegare in serie i sensori FBG, essendo realizzato da un unico sottile cavo ottico che corre lungo la fossa di comunicazione e interconnette tutti i sensori ottici.

3. Conclusioni

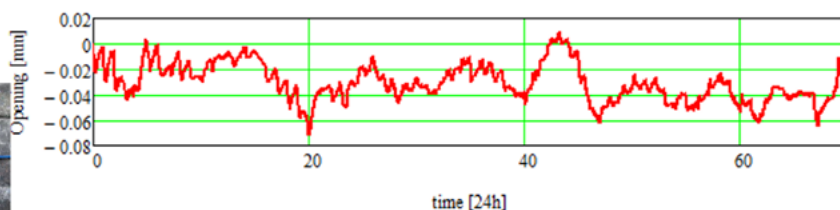


Figura 3. Le immagini mostrano una torre delle Mura Aureliane e un sensore installato su una delle sue fessure. Il grafico mostra la cronologia temporale dell'apertura di una fessura: la tendenza è guidata dalla temperatura ambiente media, con un ciclo sovrapposto di 24 ore dovuto alla variazione della temperatura notte/giorno

Elementi delicati o danneggiati possono essere strumentati per eseguire il monitoraggio strutturale statico del patrimonio culturale, sia per il controllo temporaneo della sicurezza, che nell'attività di consolidamento. Inoltre, in caso di terremoti o vibrazioni o semplice deterioramento, il monitoraggio può evidenziare il pericolo nonché la risposta dei rinforzi eventualmente presenti. I sensori FBG consentono lo sviluppo di sistemi di monitoraggio strutturale con caratteristiche quali: facile installazione su strutture in legno, metalliche e in muratura; cablaggio semplice tramite collegamento in serie di più sensori; elevata affidabilità, sia in regime di funzionamento statico che dinamico; elevata resistenza alle severe condizioni ambientali e climatiche. Il laboratorio FOS dell'ENEA applica con successo la tecnologia FBG al monitoraggio dei beni culturali, realizzando e funzionalizzando sensori in fibra ottica per la misurazione di umidità relativa e deformazione.

L'infrastruttura ICT dell'ENEA per i Beni Culturali: dal digital twin all'analisi strutturale

M. Mongelli

ENEA, SEDE Centrale, TERIN-ICT-HPC

Corresponding author: marialuisa.mongelli@enea.it

Keywords: digital twin, modellazione 3D, data integration, tecnologie digitali, infrastruttura HPC

1. Abstract

La Divisione ICT dell'ENEA, partecipa da diversi anni alle attività di ricerca per il Patrimonio Culturale. In particolare, l'infrastruttura ICT per i beni culturali, denominata IT@CHA, è accessibile, previa autenticazione, tramite un portale dedicato; essa è completamente immersa nel sistema di calcolo CRESCO6 “Centro Computazionale di RicErcA sui Sistemi Complessi”, e si basa sulla tecnologia dei “laboratori virtuali”, ossia su piattaforme fruibili via Internet, che mettono a sistema risorse hardware/software, capacità di calcolo per la definizione di copie digitali (Digital Twins), strumenti di visualizzazione, storage virtualmente illimitato, su file system geograficamente distribuiti di tipo AFS, GPFS o su ownCloud. I Digital-Twins svolgono sempre più un ruolo di supporto alle attività di conoscenza, ricerca, monitoraggio, diagnostica, per la salvaguardia e la valorizzazione del patrimonio artistico anche volte alle iniziative di Realtà Virtuale e Aumentata.

Nel progetto D-TECH “Digital-Twin Environment for Cultural Heritage”, attualmente in corso, il laboratorio HPC è impegnato nella definizione di una piattaforma web-based per gli enti gestori dei beni, volta alla gestione dei dati digitali, progettata per essere un sistema di conoscenza distribuito.

2. Il Virtual LAB IT@CHA

Il Laboratorio Virtuale IT@CHA (Italian Technologies for advanced applications on Cultural Heritage), nato dall'omonimo progetto, ormai concluso, finanziato nell'ambito del Programma Nazionale (PON) “Ricerca e Competitività 2007-2013” (<http://www.progettoitacha.it>), è una piattaforma multimediale avanzata in continuo sviluppo dedicata al settore dei Beni Culturali, con accesso web remoto, in grado di condividere risorse hardware e software per la definizione di modelli numerici, dalle ricostruzioni 3D da nuvole di punti (Digital Twins) ai modelli agli elementi finiti (FE), per l'analisi strutturale.

Tale piattaforma opera sull'intera catena di modellazione numerica, secondo i principi FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) per l'uso integrato degli strumenti, con l'obiettivo di evidenziare l'interoperabilità, la scalabilità e la versatilità [1]. L'adozione di questi principi, quindi, permette di operare con standard riconosciuti e aperti per dati e metadati, per la loro trasmissione e comunicazione, e per i software utilizzati, inoltre consente di mettere a disposizione del resto della comunità scientifica e degli studiosi i propri dati e risultati ottenuti, in modo regolamentato, tutelando i diritti di attribuzione e favorendone la diffusione e lo scambio [2].

Ciò premesso, IT@CHA, offre capacità hardware e software per definire modelli 3D, nonché aree per condividere immagini, documenti, dati sperimentali e archiviare grandi volumi di dati, con capacità di calcolo virtualmente illimitata, su sistemi di file geograficamente distribuiti come AFS, GPFS o su ownCloud. Essa sfrutta le risorse di calcolo di un pool di macchine dell'infrastruttura, dedicate alle applicazioni grafiche. In particolare, offre la possibilità di ottenere ricostruzioni fotogrammetriche attraverso il software Agisoft Metashape, la loro manipolazione tramite il software Meshlab (sviluppato da ISTI-CNR) oltre ad altri software open-source per l'elaborazione grafica tridimensionale. Il controllo remoto di queste applicazioni è gestito da un componente software della piattaforma che ridirige il rendering sfruttando le risorse dei server remoti. Ciò permette quindi sia l'elaborazione intensiva che il rendering dell'ambiente grafico.

In Tabella 1 sono mostrate le caratteristiche hardware delle macchine con le quali opera la piattaforma.

Tabella 1. Caratteristiche hardware del Virtual lab IT@CHA

Hostname	CPU	Memory	GPU
cresco6-nvi1	2x Intel Xeon Platinum 8160 2.10GHz 48 cores	192 GB	Nvidia Tesla V100 32 GB
cresco6-nvi2	2x Intel Xeon Platinum 8160 2.10GHz 48 cores	192 GB	Nvidia Tesla V100 32 GB
cresco4-nvi1	2x Intel Xeon E5-2680 2.80 GHz 20 cores	64 GB	2x Nvidia K40m 12GB

Nel corso degli anni sono state sviluppate nuove implementazioni e funzionalità, come un moderno database NoSQL dedicato per archiviare i metadati degli oggetti digitali, rendendoli disponibili per ulteriori lavori e ricerche e per integrarsi facilmente con servizi di visualizzazione avanzati come 3D HOP o il server IPIImage per immagini ad alta risoluzione di gigapixel [3].

Queste nuove capacità sono ospitate su una macchina virtuale dedicata (heritagescience.portici.enea.it) gestita in un cluster VMWare per garantire ridondanza e backup.

3. Conclusioni

La possibilità di eseguire tutte le elaborazioni di modellazione numerica in un singolo ambiente gestibile a distanza, mediante la piattaforma IT@CHA, con capacità di calcolo adeguate, rappresenta un indiscutibile vantaggio. Inoltre, è prevista l'implementazione con altri software open source per l'analisi dimensionale e geometrica, il confronto e la visualizzazione in modalità multi-risoluzione delle nuvole di punti, nonché il riconoscimento automatico di modelli.

4. Bibliografia

1. Wilkinson, M., et al., 2016, The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data 3, 160018, <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
2. Canciani, M. et al., 2020, Modelli 3D e dati GIS: una loro integrazione per lo studio e la valorizzazione dei beni culturali, in Archeomatica N°2, giugno 2020, pp.18-23
3. Puccini, M., et al., 2021, Integrated Survey and 3D Processing on Enea CRESCO Platform: the Case Study of San Nicolain Carcere in Rome, Journal of Physics: Conference Series, Volume 2204, 2021 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo 2021) 20-22 October 2021, Milan, Italy doi 10.1088/1742-6596/2204/1/012101.

Protezione sismica dei beni architettonici

B. Carpani

ENEA, C.R. Brasimone, SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: bruno.carpani@enea.it

Keywords: patrimonio architettonico, monumenti, tecniche antisismiche, vulnerabilità sismica, archeosismologia

1. Introduzione

In questo documento vengono sinteticamente presentati alcuni degli interventi più significativi realizzati con il contributo del laboratorio di ingegneria sismica dell'ENEA (attualmente SSPT-MET-DISPREV) nel campo della protezione del patrimonio architettonico. Le attività qui descritte coprono un arco di tempo che parte dalla metà degli anni '90 e arriva alla fine dell'ultimo decennio. Si tratta di arco temporale significativo, che vede interventi antisismici innovativi (a volte pionieristici) a fianco ad altri di tipo più tradizionale ma tutti contraddistinti da un approccio aperto e multidisciplinare alla ricerca.

2. Abstract

A seguito dei terremoti di Reggio Emilia (1996) e Marche-Umbria (1997), nell'ambito del progetto EU ISTECH, ENEA ha partecipato agli interventi di miglioramento sismico del campanile di Trignano (RE) e del timpano della basilica di S. Francesco di Assisi (figura 1) dove, per la prima volta al mondo (1999), sono stati utilizzati dispositivi in leghe a memoria di forma (SMAD) a comportamento superelastico [1].



Figura 1: Basilica di S. Francesco e campanile di Trignano: dettagli dispositivi SMAD

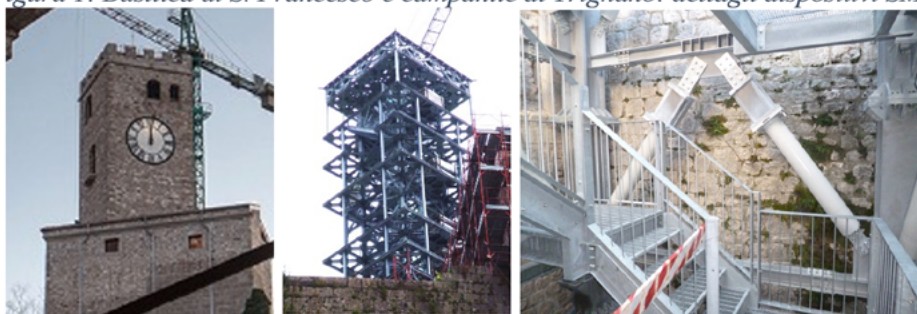


Figura 2: Torre dell'Orologio Gemona, dettagli della struttura e dei dispositivi BRAD

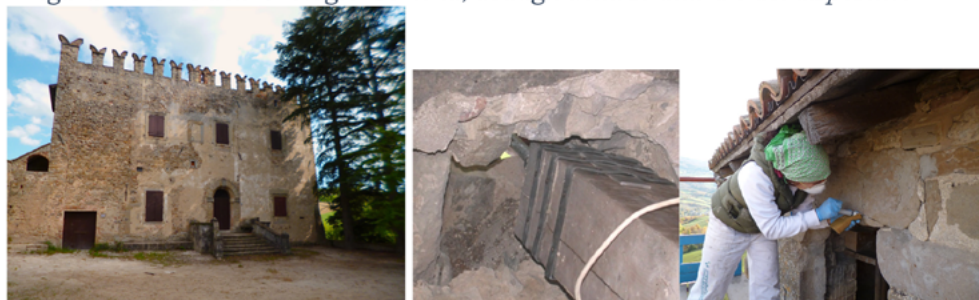


Figura 3: Torre di Montorio: vista della facciata e dettagli degli interventi

Un altro intervento con tecnologie innovative riguarda l'utilizzo di dispositivi a instabilità impedita (BRAD), grazie ai quali è stata finalmente realizzata la tanto attesa ricomposizione della Torre dell'Orologio di Gemona (2015) (figura 2), crollata a seguito del sisma del 1976 [2].

ENEA ha supervisionato l'intervento di restauro antisismico del complesso architettonico della Torre di Montorio (XIII-XVIII sec., figura 3), danneggiato dal sisma Appennino Emiliano del 2003. In questo caso è stato utilizzato un approccio filologico che, grazie anche all'utilizzo di metodi storici e archeosismologici, ha permesso di individuare il comportamento sismico del complesso e definire tecniche di intervento coerenti con il lessico costruttivo originale [3].

3. Conclusioni

Gli interventi di restauro e miglioramento sismico qui brevemente illustrati riguardano importanti monumenti e dimostrano come ENEA abbia svolto un ruolo significativo nella protezione sismica del patrimonio architettonico, mostrano anche come le tecnologie innovative possano essere efficacemente integrate anche da analisi storiche e archeosismologiche.

4. Bibliografia

1. M. Indirli, B. Spadoni, B. Carpani, R. Cami, P. Clemente, A. Martelli, M. G. Castellano, "Research, Development and Application of Advanced Antiseismic Techniques for Cultural Heritage in Italy", "Proc. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures", Yerevan, Armenia, October 6-10, 2003.
2. R. Antonucci, B. Carpani, A. Poggianti, "Restauro e ricomposizione della Torre dell'Orologio a Gemona", "Proc. Seminar: New ideas for the seismic retrofitting of historical buildings", ENEA, 11 maggio 2010, available at: <http://www.enea.it/eventi/eventi2010/AdeguamentoSismico110510/Resoconto110510.html>
3. Carpani B., Antonucci R., "The Seismic Restoration of the Medieval Architectural Complex of the Montorio Tower (Northern Italy)", Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, PROHITEC 2014, pp. 127-132, ISBN 978-975-518-361-9.

Applicazioni del moto magnificato ai beni culturali

E. Fioriti, I. Roselli, A. Cataldo, C. Ormando, A. Colucci

ENEA - C.R. Casaccia – SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: vincenzo.fioriti@enea.it

Keywords: video digitali, moto magnificato, patrimonio culturale

1. Abstract

Recenti sviluppi nel campo della elaborazione video digitale hanno spalancato la porta ad analisi visive e quantitative per strutture sottoposte a vibrazione che sembravano impensabili. Il laboratorio DISPREV ha implementato queste analisi alla protezione del patrimonio culturale minacciato da vibrazioni ambientali distruttive.

2. Introduzione

Il moto magnificato (MM) consente di effettuare la caratterizzazione dinamica di strutture per mezzo di comuni video digitali [1, 2]. I video vengono ottenuti da telecamere commerciali, e successivamente sono elaborati tramite particolari algoritmi che amplificano i piccoli movimenti della struttura o di sue parti. Non si tratta di un semplice ingrandimento delle immagini, ma di una vera e propria magnificazione dei piccoli moti, altrimenti invisibili a occhio nudo. Gli algoritmi sono di recentemente implementazione, ma finora utilizzati in altri campi (medicina, fisiologia, biologia, meccanica, materiali). Abbiamo applicato il MM a famosi monumenti: il Sarcofago degli sposi, il tempio di Minerva Medica, la Torre di Pisa, il ponte delle Torri di Spoleto, la Tomba Campana ed a modelli in scala in muratura testati su tavola vibrante [3, 4].

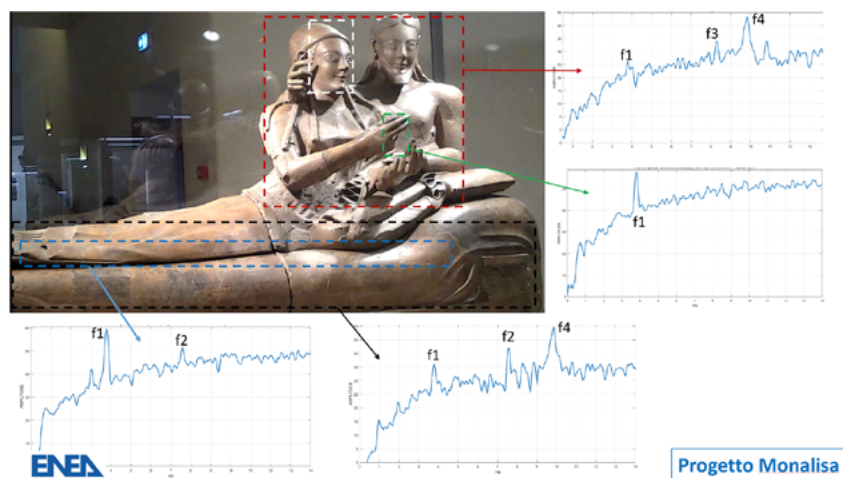


Figura 1: Un frame del video magnificato e la analisi nel dominio delle frequenze.

3. Conclusioni

Per quanto le difficoltà tecniche non manchino, soprattutto lavorando sul campo, il MM si è rivelato uno strumento utile ed economico per l'analisi delle vibrazioni ambientali. In taluni casi, qualora sia richiesto un approccio contactless, risulta anche necessario.

4. Bibliografia

1. Wu, H.-Y.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Guttag, J.V.; Durand, F.; Freeman, W.T. Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world. *ACM Trans. On Graphics* 2012, 31(4), 65.
2. Wadhwa, N.; Wu, H.Y.; Davis, A.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Mysore, G.J.; Chen, J.G.; Buyukozturk, O.; Guttag, J.V.; Freeman, W.T.; Durand, F. Eulerian Video Magnification and Analysis. *Communications of the ACM* 2017, 60, pp 87- 95.
3. Fioriti, V.; Roselli, R.; De Canio, G. Frequency Domain Analysis of the Minerva Medica Temple by means of the Motion Magnification Methodology. In *Proceedings of Metroarchaeo 2018*, Cassino, Italy, 22-24 October 2018.
4. Fioriti, V.; Roselli I.; Tati A.; Romano R.; De Canio, G. Motion Magnification analysis for structural monitoring of ancient constructions. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 2018, 129, pp. 375-380.

Studio delle vibrazioni e sperimentazione su tavola vibrante per la protezione dei beni culturali

I. Roselli, V. Fioriti, A. Cataldo, M. Baldini, A. Colucci, A. Picca

ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: ivan.roselli@enea.it

Keywords: vibrazioni, tavola vibrante, protezione sismica

1. Introduzione

Gli oggetti d'arte e le strutture antiche possono essere particolarmente vulnerabili alle vibrazioni, sia di origine naturale (come i terremoti) sia di origine antropica (ad esempio lavori in cantieri edili e traffico di mezzi di trasporti in contesti fortemente urbanizzati). Le prove su tavola vibrante costituiscono la tecnica più affidabile di sperimentazione in laboratorio in grado di riprodurre realisticamente l'eccitazione vibrazionale su oggetti di grandi dimensioni, anche strutture o parti di strutture. La hall sismica presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia è dotata di 2 tavole vibranti a 6 GDL tra le più grandi d'Europa, ancora oggi all'avanguardia per dimensioni e prestazioni. La tavola vibrante più grande, di dimensioni di 4 x 4 m² e capace di spostamenti massimi di 12,5 cm in tutte le direzioni, permette di testare anche prototipi di strutture in scala reale fino a due livelli (altezza di oltre 5 m). Questi impianti sperimentali sono arricchiti e innovati costantemente 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. Grazie all'aggiornamento, 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, la quale è in grado di fornire indicazioni sulla risposta di un oggetto sottoposto a vibrazione dall'analisi di semplici filmati, 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 l'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). Questa costituisce una rete di laboratori in grado di offrire accesso a strumenti scientifici e conoscenze all'avanguardia nel settore dei Beni Culturali.

La hall sismica è dotata anche di due shaker elettrodinamici di grandi dimensioni (il più grande con tavola di scorrimento da 1,50 x 1,50 m²) per riprodurre vibrazioni monodirezionali fino a 2000 Hz. Un'altra grande macchina di cui è attrezzata la hall sismica del Centro Ricerche ENEA Casaccia è un muro di reazione dotato di due attuatori posizionabili a diverse altezze fino a 3,4 m, in grado di eseguire prove di spinta orizzontale dinamiche o pseudo-statiche.

Le grandi dimensioni della hall sismica consentono di attrezzare una vera e propria area di cantiere di estensione fino a circa 10 x 13 m² per la costruzione in sicurezza di prototipi di strutture da sottoporre ai test di vibrazione.

A corredo della hall sismica si dispone anche di una batteria di camere ambientali (camere climatiche

e a nebbia salina di varie dimensioni e prestazioni) per prove di invecchiamento accelerato su provini anche di notevoli dimensioni che poi debbano essere testati anche a vibrazione post-invecchiamento.

2. Linee di attività principali

Una importante linea di ricerca è quella sulla validazione sperimentale di sistemi di isolamento di statue e oggetti museali, quali i basamenti antisismici per i Bronzi di Riace e per il Sarcofago degli Sposi del Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma (progetto MONALISA).

Una esperienza recente di grande successo è stata quella del progetto RestArt. I partner del progetto hanno sviluppato un metodo innovativo per la ricomposizione di grandi frammenti lapidei tramite un sistema mecatronico di alta precisione. Al fine di verificarne l'efficacia, sono state svolte una serie di prove su tavola vibrante (figura 1a) su pilastri in marmo e in travertino sottoposti a vibrazioni generate da terremoti estremi o da trasporti ad alta velocità su strada fortemente sconnessa.

Grande impegno è dedicato allo studio di nuove tecniche di rinforzo antisismico delle murature storiche. Questo tema è molto rilevante in Italia, dove buona parte del patrimonio costruito esistente è in zone a media e alta sismicità ed è rappresentato da questa tipologia, spesso di scarsa qualità ed elevata vulnerabilità sismica. Ad esempio, diverse opzioni del rinforzo sono state formulate nel progetto RIPARA e testate su pannelli murari sottoposti a prove cicliche con muro di reazione. I suddetti interventi di rinforzo sono stati poi sperimentati anche su una casetta in muratura storica tipica delle zone epicentrali della sequenza sismica dell'Italia centrale, sottoposta a test su tavola vibrante con e senza rinforzo (figura 1b).

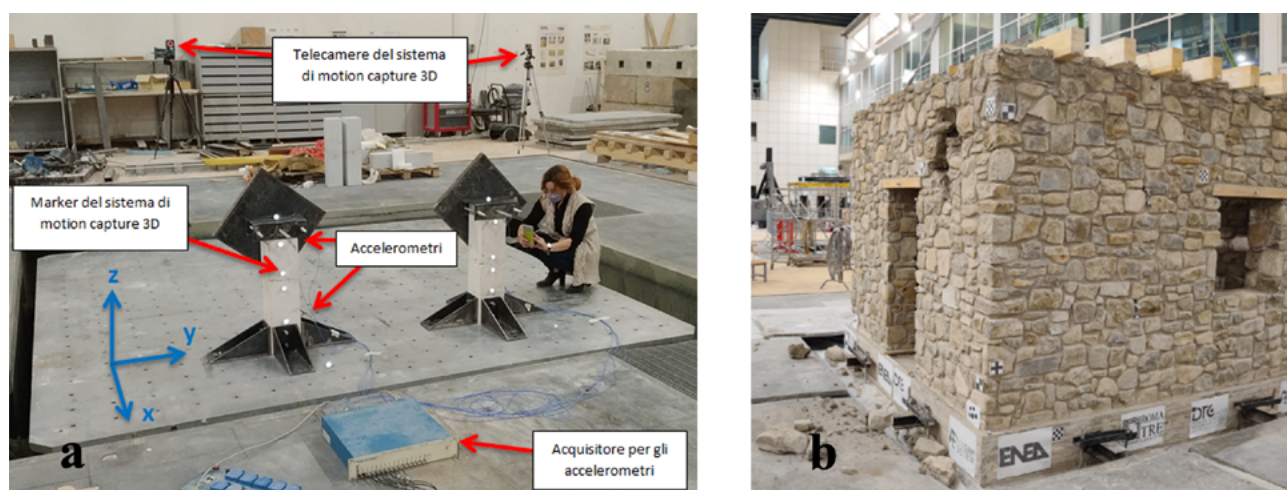


Figura 1: Prove su tavola vibrante prova: a) confronto della resistenza a vibrazione sismica di un provino in marmo ricomposto con tecnica tradizionale (sinistra) e uno ricomposto con sistema RestArt (destra); b) casetta in muratura storica tipica delle zone epicentrali della sequenza sismica dell'Italia centrale 2016-201

Modellazione e analisi strutturale per la salvaguardia dei Beni Culturali

F. Saitta

ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: fernando.saitta@enea.it

Keywords: Finite Elements, Structural Analysis, Masonry Structures, Cultural Heritage

1. Introduzione

La modellazione e analisi strutturale ad elementi finiti o mediante definizione dei meccanismi di collasso, pur con i suoi limiti, riveste un ruolo fondamentale nella salvaguardia dei beni culturali in quanto traduce in termini meccanici il comportamento di una costruzione. Il contributo mostra alcuni dei modelli sviluppati dall'autore nell'ambito di studi e attività svolte in ENEA.

2. Casi studio

Modelli strutturali ad elementi finiti solidi o monodimensionali sono stati definiti nell'ambito di studi sulle torri in muratura. La Figura 1 mostra a sinistra il modello sviluppato nell'ambito di uno studio sulla vulnerabilità del minareto di Jam [1], con le relative forme modali, mentre a destra si riporta il modello della torre stilita di Umm Ar-Rasas [2] con i domini di resistenza di una sezione.

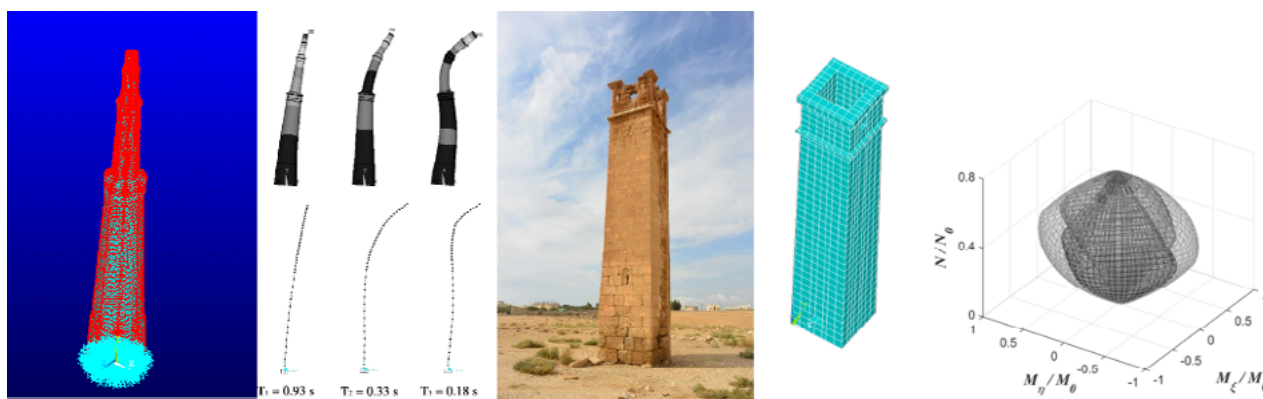


Figura 1: Modello del Minareto di Jam e della torre stilita di Um Ar-Rasas

Per quanto riguarda gli edifici storici, tra i casi trattati, si riportano il Palazzo marchese di San Giuliano [3] di Puglia, ad elementi finiti solidi, e Palazzo Torlonia in Avezzano (Figura 2), quest'ultimo a telaio equivalente, per la valutazione della vulnerabilità sismica.

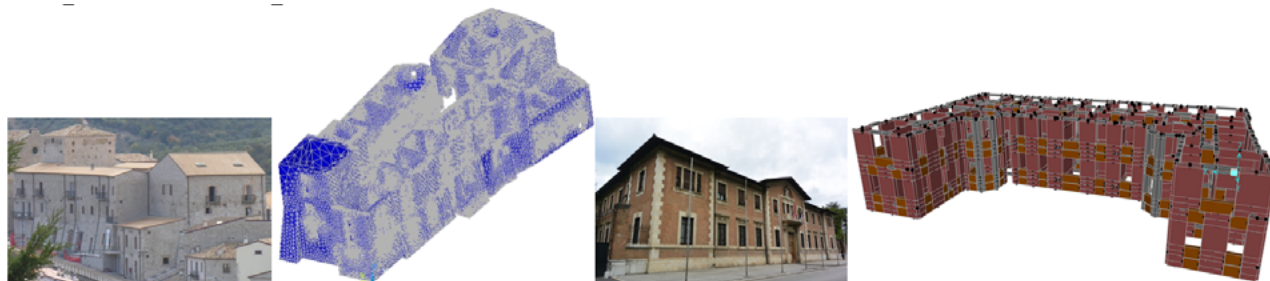


Figura 2: Modello del Palazzo Marchese e del Palazzo Torlonia

Con riferimento allo studio di vibrazioni indotte dal traffico sui monumenti, si evidenzia la modellazione del Tempio di Minerva Medica a Roma (Figura 3) [4].

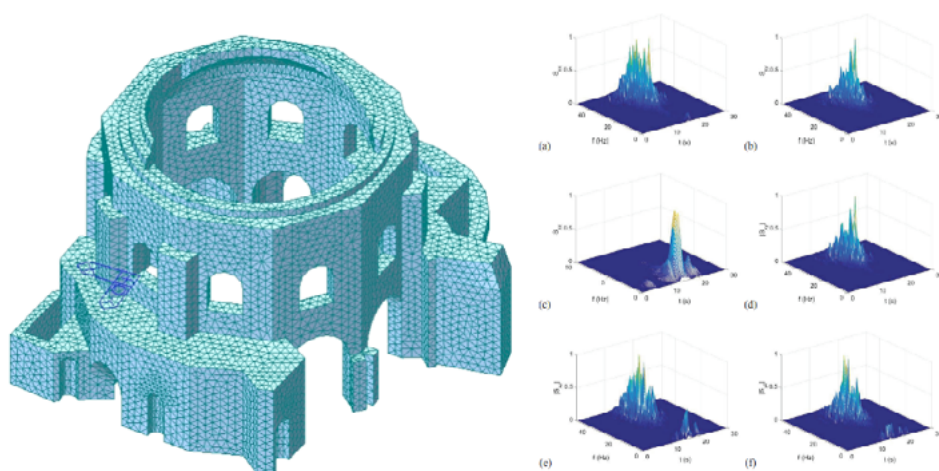


Figura 3: Modello del Tempio di Minerva Medica e spettri di potenza da traffico tranviario

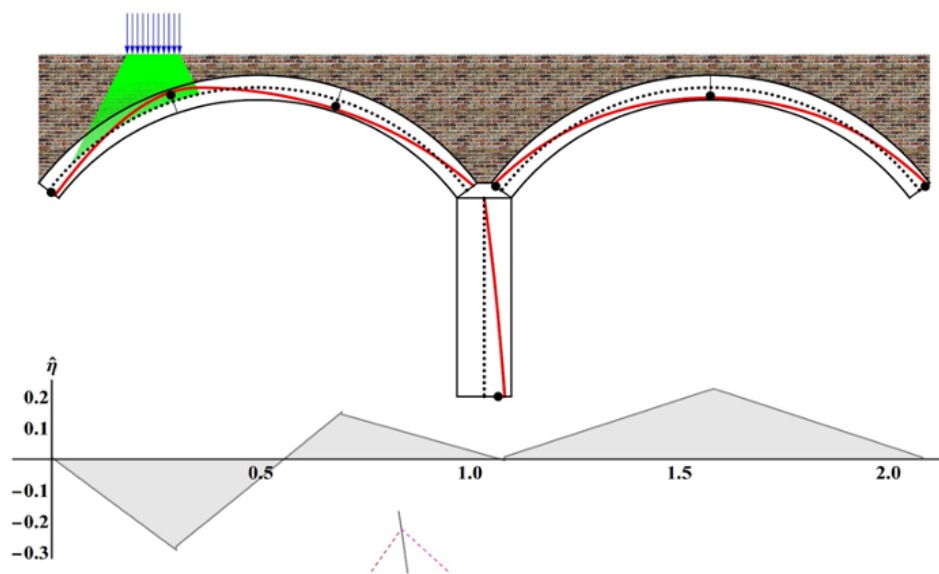


Figura 4: Analisi limite di ponte ad arco in muratura.

Infine, sono di interesse per i ponti storici ad arco in muratura gli studi effettuati per la valutazione del carico di collasso (Figura 4) mediante l'analisi limite [5], con lo sviluppo dei relativi codici di calcolo.

3. Conclusioni

Il documento riporta in estrema sintesi alcuni dei modelli sviluppati per analisi dinamiche, studi di vulnerabilità strutturale e sismica, sia mediante elementi finiti utilizzando software commerciali, sia mediante codici appositamente sviluppati.

4. Bibliografia

1. Clemente, P., Saitta, F., Buffarini, G., Platania, L. (2015). Stability and seismic analyses of leaning towers: The case of the minaret in Jam (2015) Structural Design of Tall and Special Buildings, 24 (1)
2. Clemente, P., Delmonaco, G., Puzzilli, L., Saitta, F. (2019) "STABILITY AND SEISMIC VULNERABILITY OF THE STYLITE TOWER AT UMM AR-RASAS, Annals of Geophysics, 62 (3),
3. F. Saitta, G. Bongiovanni, G. Buffarini, P. Clemente, D. Rinaldis, G. Rossi, Nonlinear Analysis of an Historical Building under Earthquake loading, 10NCEE, July 2014
4. Saitta, F., Forliti, S., Colucci, A., Tati, A., Roselli, I. (2020). Dynamic modelling of tram-induced vibration on the temple of Minerva medica in Rome. Proceedings of the XI International Conference on Structural Dynamics EURODDYN2020, 23-26 November, Athens, Greece
5. Saitta F., Clemente P., Buffarini G., Bongiovanni G. (2020). The Mechanism Method in the Analysis of Two-Span Masonry Arch Bridges. In: Arède A., Costa C. (eds) Proceedings of ARCH 2019 (ARCH 2019, Porto 2-4 Oct 2019). Structural Integrity, Vol 11. Springer

L'analisi vibrazionale sperimentale nella salvaguardia dei beni culturali

P. Clemente

ENEA, C.R. Casaccia, TERIN-SEN-APIC

Corresponding author: paolo.clemente@enea.it

Keywords: rischio sismico, salvaguardia dei beni culturali, analisi vibrazionale sperimentale

La storia insegna che la maggior parte dei monumenti antichi sono stati definitivamente distrutti da eventi naturali, e i terremoti sono stati la causa più comune di crollo. D'altro canto, l'invecchiamento naturale dei materiali, associato all'erosione dovuta al vento e alla pioggia, nonché agli agenti inquinanti e agli effetti dei cicli termici, può determinare un continuo deterioramento delle superfici esposte con una significativa riduzione della resistenza del materiale e della capacità strutturale. Inoltre, le vibrazioni indotte dal traffico possono accelerare i processi di degrado, favorendo un significativo aumento della vulnerabilità alle azioni statiche e dinamiche o addirittura un crollo improvviso sotto azioni sismiche.

L'analisi degli effetti delle suddette sollecitazioni sulle strutture del patrimonio culturale è piuttosto complicata anche a causa della scarsa conoscenza della geometria reale e dei materiali, soprattutto con riferimento alle fondazioni e alle caratteristiche del terreno, ma spesso anche alla struttura in elevazione. Non sempre gli elementi ed i materiali visibili corrispondono a quelli strutturali interni non visibili. Sono pertanto necessarie analisi dettagliate che dovrebbero essere eseguite preferibilmente utilizzando test non distruttivi.

Inoltre, nella maggior parte dei casi, i siti e le strutture monumentali sono stati costruiti senza tenere conto delle azioni orizzontali; quindi, sono molto vulnerabili ai terremoti e alle vibrazioni indotte dal traffico. Esse rappresentano azioni continue che interessano gli edifici ma costituiscono anche un'ideale e gratuita fonte di eccitazione per l'analisi vibrazionale sperimentale delle strutture. Perciò le vibrazioni indotte dal traffico sono ampiamente utilizzate per indagare lo stato di salute strutturale anche di edifici storici.

Vale la pena ricordare che il comportamento dinamico delle strutture storiche è piuttosto complesso per diversi motivi, quali la complessità delle caratteristiche geometriche, il comportamento non lineare del materiale e la non efficacia della connessione tra elementi verticali e orizzontali. Di conseguenza l'identificazione delle caratteristiche dinamiche e l'analisi sismica sono piuttosto complesse. Inoltre, l'analisi numerica mediante modelli agli elementi finiti, che di solito è molto utile per analizzare il comportamento atteso e anche per interpretare i risultati sperimentali, contiene grandi incertezze legate alle dimensioni effettive dei vari elementi strutturali e alle caratteristiche dei materiali, che spesso presentano comportamenti anelastici. Pertanto, per questo tipo di strutture l'analisi sperimentale è spesso l'unico modo per migliorare la comprensione del loro comportamento dinamico. In alcuni casi, l'interazione terreno-struttura gioca un ruolo fondamentale nella stabilità e nel comportamento dinamico.

Le prime applicazioni interessanti riguardarono monumenti di Roma (l'Obelisco Flaminio, le Colonne Aureliane e Traiane, il Tempio di Minerva Medica, il Colosseo, ...). Le strutture sono state strumentate e gli effetti delle vibrazioni ambientali e indotte dal traffico sono stati registrati e analizzati nei domini del tempo e della frequenza, estraendo le proprietà dinamiche delle strutture. Alcuni monumenti sono stati nuovamente testati dopo diversi anni, fornendo informazioni aggiornate sul loro comportamento dinamico e sullo stato di salute strutturale. Tra le altre principali applicazioni è val la pena ricordare:

- Villa Farnesina a Roma, protetta dagli effetti del traffico veicolare pesante, mediante l'inserimento di una pavimentazione antivibrante sul Lungotevere.
- Il Campanile medievale della Chiesa di S. Giorgio in Trignano, Italia, gravemente danneggiato dal Terremoto di Reggio Emilia del 15 ottobre 1996, monitorato per due mesi da una rete di accelerometri.

- Il complesso edilizio del Centro di Documentazione e Ricerche Antropologiche della Valnerina a Cerreto di Spoleto, danneggiato dalla sequenza sismica Umbria-Marchigiana del 1997.
- Palazzo Marchesale a San Giuliano di Puglia, dove è stata installata una rete accelerometrica fissa dopo l'intervento di retrofit.
- Il Circo Massimo di Roma, dove sono stati registrati e analizzati gli effetti di un concerto di musica leggera.

1. Bibliografia

1. Puzzilli L., Bongiovanni G., Clemente P., Di Fiore V., Verrubbi V., Effects of Anthropoc and Ambient Vibrations on Archaeological Sites: The Case of the Circus Maximus in Rome. *Geosciences* 2021, Vol. 11, No. 11, 463, MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, <https://doi.org/10.3390/geosciences11110463>.
2. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Saitta F., Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column. *Int. J. of Architectural Heritage*, Taylor & Francis, Vol. 15, No. 1, 64-78, <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1706785>.
3. Clemente P., Delmonaco G., Puzzilli L., Saitta F., Stability and seismic vulnerability of the Stylite Tower at Umm ar-Rasas. *Annals of Geophysics*, Vol. 62, No. 3, SE340, INGV, Rome, <https://doi.org/10.4401/ag-8004>.
4. Alberti L., Azzara R., Clemente P., Lessons from the past: the evolution of seismic protection techniques in the history of building. Preface to Special Issue of *Annals of Geophysics*, Vol. 62, No. 3, SE345, INGV, Rome, <https://doi.org/10.4401/ag-8373>.
5. Clemente P., Extending the life span of cultural heritage structures. Foreword to *Structural Health Monitoring of Cultural Heritage Structures*, Special Issue *J. of Civil Structural Health Monitoring*, Springer, Vol. 8, 171-179, <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0278-3>.
6. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F., Experimental vibration analyses of a historic tower structure. *J. of Civil Structural Health Monitoring*, Springer, Vol. 7, No. 5, 601-613, <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0245-4>.
7. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F., Dynamic Characteristics of the Amphitheatrum Flavium northern wall from traffic-induced vibrations. *Annals of Geophysics*, Vol. 60, No. 4, S0439, INGV, Rome, <https://doi.org/10.4401/ag-7178>.
8. Clemente P., Hailemikael S., Milana G., Orlando L., Monitoring and Seismic Characterization of Archaeological Sites and Structures. Preface. Foreword to Special Issue of *Annals of Geophysics*, Vol. 60, No. 4, S0447, <https://doi.org/10.4401/ag-7480>.
9. De Stefano A., Matta E., Clemente P., Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences. *J. of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 6, No. 1, 83-106, Springer, <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0154-y>.
10. Clemente P., Saitta F., Buffarini G., Platania L., Stability and seismic analyses of leaning towers: the case of the minaret in Jam. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, 40-58, Wiley, <https://doi.org/10.1002/tal.1153>.
11. Clemente P., Rinaldis D., Buffarini G., Experimental seismic analysis of a historical building. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, No. 8, 777-784, SAGE Publications, ISSN 1045-389X.07.08.0777-8, <https://doi.org/10.1177/1045389X07074601>.
12. Indirli M., Castellano M.G., Clemente P., Martelli A., Demo Application of Shape Memory Alloy Devices: The Rehabilitation of S. Giorgio Church in Trignano. *Proc. SPIE 4330, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 4330, No. 1, 262-272, <https://doi.org/10.1117/12.434126>.

Attività sui controlli non distruttivi (CND) e sviluppo e realizzazione di software dedicati ai CND per la conservazione dei beni culturali

A. Tati

ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-PROMA-MATPRO

Corresponding author: angelo.tati@enea.it

Keywords: Non-Destructive Testing, Sonic Test, Ultrasonic Test, Tomography and X-ray radiography, Thermography, Visual Test

1. Introduzione

L'ENEA CR Casaccia è dotato di un Laboratorio per CND afferente all'unità SSPT-PROMA-MATPRO che opera nella diagnostica in campo industriale, civile e dei Beni Monumentali. Il Laboratorio può effettuare: caratterizzazione e analisi difettologica di componenti e nuovi materiali; caratterizzazione sonde e strumentazione per CND; sviluppo di software dedicato a sistemi automatici per i controlli non distruttivi; formazione. Potenziali utenti di tale servizio sono: settore aeronautico, navale, fissione nucleare, fusione nucleare, automotive, trasporti ferroviari, costruzioni in muratura e in calcestruzzo, Beni Architettonici e Monumentali.

2. Abstract

Effettua analisi non distruttive in settori industriali in cui siano coinvolti aspetti di sicurezza, per l'uomo e per l'ambiente, e di garanzia della qualità del prodotto. Applica metodi sia innovativi che tradizionali per la messa a punto dei processi di produzione, per controlli di qualità del prodotto e per l'ispezione in servizio di componenti di impianto, inoltre esegue interventi diagnostici su monumenti ed Edifici Storici e collabora con Musei e Sovrintendenze.

Nel campo dei Beni Culturali il laboratorio CND ha eseguito negli anni diversi interventi diagnostici su opere di pregio Storico/Artistico tra le tante le più significative:

Obelisco del Laterano a Roma: Prove soniche ed ultrasoniche sui giunti di connessione dei conci di granito ed eseguiti durante il restauro cinquecentesco, sviluppo di un software di Tomografia Sonica per l'analisi dei giunti e il successivo calcolo FEM per lo studio della vulnerabilità sismica del monumento, ricostruzione 3D dell'Obelisco tramite Scanner laser.

Apollo di Veio - Museo di Valle Giulia - Roma: Ispezione Endoscopica e analisi termografica

Bronzi di Riace - Museo della Magna Grecia - Reggio Calabria: Esame Ultrasonoro per la determinazione degli spessori, successiva analisi FEM e la progettazione del dispositivo antisismico.

Duomo di Orvieto: Quadro fessurativo delle colonne e della navata centrale, Vulnerabilità sismica della struttura tramite tomografia sonica, Scanner laser e termografia

Bronzo di San Pietro - Basilica Vaticana: ispezione endoscopica

Santa Croce, Cappella del Baroncelli, Firenze: Analisi termografica per l'individuazione dei distacchi di affresco

Cupola di S. Maria della Pace - Massa Martana PG: Rilievo architettonico tramite scansione laser e analisi termografica per la rivelazione e la mappatura dei distacchi dell'affresco

Stanza Eliodoro - Raffaello - Musei Vaticani: analisi termografica per la rivelazione e la mappatura dei distacchi dell'affresco

Tempio di Minerva Medica Roma: Prove Soniche, Scansione laser, termografia e monitoraggio microclimatico

Basamento della statua di Bonifacio VIII Musei capitolini: Tomografia Sonica

Basamento della statua di Filippo Corridoni Parma: Prove soniche

Palazzo della Farnesina sede del ministero degli Esteri Roma: controllo dei controsoffitti e del rivestimento esterno tramite termografia ed altre tecniche

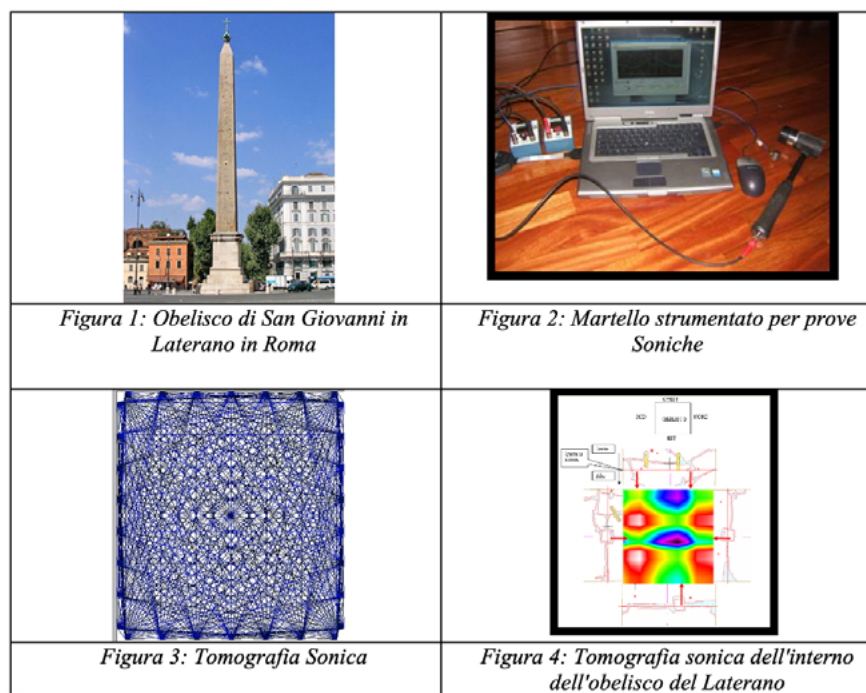
Busto di Scipione Borghese, Erma di Bacco, Statua di Ercole - Galleria Borghese Roma: Ricerca Ferri, endoscopia e prove ultrasoniche

Elmi Veneziani recuperati a Torre Santa Sabina Brindisi ICR Roma: Tomografia a Raggi X

Palazzo Todesco, Palazzo Piazzoni Vittorio Veneto Treviso: Scanner laser, termografia, prove soniche e ultrasuoni

3. Conclusioni

Le attività elencate sono alcune delle tantissime applicazioni delle prove non distruttive nel campo dei beni culturali effettuate dal laboratorio prove non distruttive dell'ENEA Casaccia. Queste tecniche sviluppate per il settore Nucleare sono state trasferite negli anni nel campo dei Beni Culturali. Oltre l'analisi dei materiali delle opere artistiche per la ricerca di piccoli difetti queste tecniche sono adoperate anche per la analisi strutturale di grandi manufatti come chiese e Palazzi. Nel 2020 si aggiunta alla strumentazione esistente il nuovo Tomografo Gilardoni che offre 2 sorgenti radiogene una alta potenza di 450 KV e un microfuoco da 150 KV che permettono l'analisi di opere di diversa grandezza e con risoluzioni dell'immagine radiografica che va dal decimo di mm al micron. L'acquisizione è stata possibile tramite il progetto MAIA della regione Lazio e dell'ENEA per la ristrutturazione della hall tecnologica.



4. Bibliografia

1. Ivan Roselli, A. Tati, Vincenzo Fioriti, Marina Magnani Cianetti, et al., Integrated approach to structural diagnosis by non-destructive techniques: the case of the Temple of Minerva Medica October 2018 DOI: 10.21014/acta_imeko.v7i3.558.
2. Gerardo De Canio, Marialuisa Mongelli, A. Tati, Flavio Borfecchia, Structural monitoring of the columns at the Cathedral of Orvieto, July 2015. Conference: SHMII 2015 At: Torino Volume: RS9-Applications and case studies project: studio e monitoraggio del quadro fessurativo e del comportamento sismico del Duomo di Orvieto.

TECNOLOGIE ENEA PER I BENI CULTURALI: LA CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Utilizzo della radiazione Terahertz per l'analisi e la conservazione dei beni culturali

E. Giovenale¹, A. Doria¹, G.P. Gallerano¹, M. Greco²

¹ ENEA – C. R. Frascati – FSN--PLAS-PAX

² Università di Roma Tre - Roma, Italy

Corresponding author: emilio.giovenale@enea.it

Keywords: THz radiation, subsurface detection, water detection, Art conservation

1. Abstract

Negli ultimi anni le tecnologie di imaging THz hanno trovato impiego in diversi campi di applicazione. Nel centro ENEA di Frascati sono disponibili molte sorgenti THz ed è stata sviluppata una tecnica innovativa di imaging, che ha trovato impiego come strumento di indagine nel campo dell'analisi e conservazione dei beni culturali. Le applicazioni sviluppate sfruttano le elevate capacità di penetrazione della radiazione THz nei dielettrici, e la sua alta sensibilità alla presenza dell'acqua.

2. Esperimenti

I primi esperimenti di imaging THz realizzati a Frascati risalgono al 2005 ed utilizzavano come sorgente un Laser a Elettroni Liberi Compatto, che operava nella regione spettrale tra 0.1 e 0.15 THz [1-2].

Il Sistema portatile sviluppato successivamente dall'ENEA opera in riflessione e sfrutta il fatto che la riflessione della radiazione da parte del campione produce un salto di fase nella radiazione riflessa rispetto a quella incidente, che dipende dalle proprietà ottiche del materiale. I principi di funzionamento del dispositivo sono descritti dettagliatamente in [3]. Sono stati condotti diversi esperimenti, nel framework del progetto THz-ARTE [4], che hanno confermato la capacità della radiazione THz di penetrare strati di dielettrico, come uno strato di gesso sovrapposto ad un dipinto, permettendo di vedere chiaramente il dipinto sottostante. Utilizzando questa tecnica sensibile alla fase è stato anche possibile distinguere differenti pigmenti, dato che materiali differenti producono diversi salti di fase nella riflessione. Altri esperimenti sono stati condotti, sia in laboratorio che *in situ*, su campioni in legno, per verificare la presenza di tunnel scavati dai tarli [5], e su affreschi [6] e mosaici [7], utilizzando tecniche maggiormente sofisticate per compensare le variazioni di fase indotte dalla non planarità di questo tipo di campioni.

L'ultima applicazione in ordine di tempo è stata la caratterizzazione dei parati in cuoio, utilizzati nel XVI e XVII secolo per decorare gran parte delle residenze nobili romane e delle aree limitrofe [8]. Al momento sono in programma misure per verificare la possibilità di rilevare danni da acqua e umidità in questo tipo di manufatti

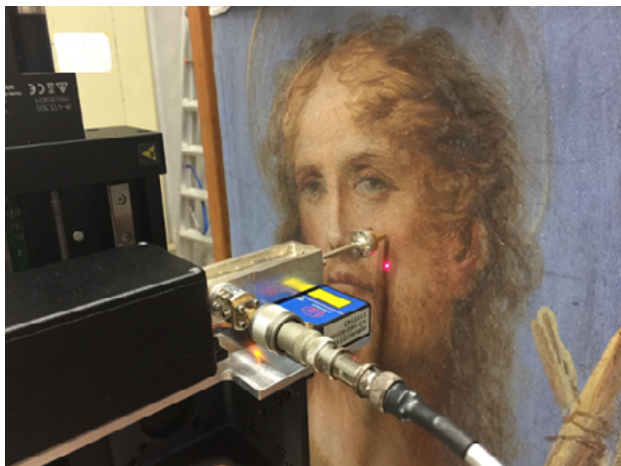


Figura 1: dettaglio del Sistema di scansione portatile 3D dell'ENEA, mentre opera su un "affresco su tabella" di Alessandro Gherardini (1655–1726) [6]. Si ringraziano il Museo di San Marco (Firenze) e i Laboratori di Restauro del Musei degli Uffizi di Firenze

3. Conclusioni

Le misure condotte nella coda a grandi lunghezze d'onda della regione del THz hanno mostrato sia le potenzialità che i limiti della tecnica sviluppata all'ENEA. I futuri sviluppi prevedono uno spostamento verso frequenze maggiori e una semplificazione del dispositivo per quelle applicazioni che non beneficiano della tecnica sensibile alla fase, come il rilevamento dell'acqua.

4. Bibliografia

1. Doria, A.; Gallerano, G.P.; Giovenale, E.; Lai, A.; Messina, G.; Germini, M.; Spassovsky, I.; Valente, F.; D'Aquino, L. Reflective terahertz imaging at the ENEA FEL facility. In Proceedings of the Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, Williamsburg, VA, USA, 19–23 September 2005; pp. 255–256.
2. Doria, A.; Gallerano, G.P.; Germini, M.; Giovenale, E.; Lai, A.; Messina, G.; Spassovsky, I.; d'Aquino, L. Imaging in the frequency range between 100 GHz and 1 THz using Compact Free Electron Lasers. In Proceedings of the Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, Shanghai, China, 18–22 September 2006; p. 161.
3. Gallerano, G.P.; Doria, A.; Germini, M.; Giovenale, E.; Messina, G.; Spassovsky, I. Phase-sensitive reflective imaging device in the mm-wave and terahertz regions. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* 2009, 30, 1351–1361.
4. Gallerano, G.P.; Doria, A.; Giovenale, E.; Messina, G.; Petralia, A.; Spassovsky, I.; Fukunaga, K.; Hosako, I. THz-ARTE: Non-invasive terahertz diagnostics for art conservation. In Proceedings of the 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Pasadena, CA, USA, 15–19 September 2008.
5. Bisceglia, B.; Doria, A.; Gallerano, G.P.; Giovenale, E.; Messina, G.; Petralia, A.; Spassovsky, I. An innovative non invasive technique for treatment of works of art. MM and THz waves for diagnostics and conservation. In Proceedings of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, Italy, 5–10 September 2010.
6. Doria, A.; Gallerano, G.P.; Giovenale, E.; Casini, A.; Cucci, C.; Picollo, M.; Poggese, M.; Stefani, L.; Fukunaga, K.; Tamassia, M. Vis-NIR Hyperspectral and Terahertz Imaging Investigations on a Fresco Painting on “Tavella” by Alessandro Gherardini. *J. Infrared Milli Terahz Waves* 2017, 34, 390–402.
7. Doria A., Gallerano G.P., Giovenale E, Senni L., Greco M, Picollo M., Cucci C., Fukunaga k. and More A.C., An Alternative Phase-Sensitive THz Imaging Technique for Art Conservation: History and New Developments at the ENEA Center of Frascati, *Appl. Sci.* 2020, 10, 7661, ch.7
8. Petrucci, F. Palazzo Chigi di Ariccia: Parati in cuoio. In *Vestire i Palazzi. Stoffe, tessuti e Parati Negli Arredi e nell'arte del Barocco*; Rodolfo, A., Volpi, C., Eds.; Edizioni Musei: Vaticani, Città del Vaticano, 2015; pp. 249–282.

La spettroscopia Raman con scansione di superficie: un protocollo diagnostico non-invasivo per la cura, il trattamento e la conservazione di beni archivistici e librari.

S. Botti, F. Bonfigli

ENEA - C.R. Frascati - FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: sabina.botti@enea.it

Keywords: protocollo spettroscopia Raman, mappatura Raman 2D, imaging spettrale, cura e conservazione beni librari.

1. Introduzione

I beni archivistici e librari rappresentano un patrimonio di valore inestimabile, ma di facile deterioramento e degrado sia naturale che accidentale. Conservare lo stato della carta e prevenirne il processo di invecchiamento rappresenta una sfida per il mondo scientifico che si occupa di beni culturali; lo scopo del nostro lavoro è lo sviluppo di un protocollo diagnostico non - distruttivo, rapido ed efficace per caratterizzare lo stato di salute della carta. La non invasività di una tecnica diagnostica risulta di fondamentale importanza quando si studiano beni culturali cartacei di interesse storico/letterario, per questo nello sviluppo del nostro protocollo abbiamo utilizzato la spettroscopia Raman che è intrinsecamente non-distruttiva poiché sfrutta l'interazione luce-materia non entrando in diretto contatto con il campione.

La spettroscopia Raman è una tecnica diagnostica che fornisce informazioni sulla composizione chimica e strutturale del campione. Inoltre, quando si accoppia un microscopio ottico ad uno spettrometro Raman, si può andare oltre l'informazione puramente morfologica ed accoppiare all'immagine ottica del campione in studio la sua mappa spettrale/composizionale. Il nostro protocollo diagnostico è basato su indici spettroscopici in grado di seguire separatamente l'evoluzione dei processi ossidativi (indici $O_I = A_{(1640-1850)\text{cm}^{-1}}/A_{(1500-1600)\text{cm}^{-1}}$ e $O_T = A_{(1500-2800)\text{cm}^{-1}}/A_{(700-3000)\text{cm}^{-1}}$)

e di idrolisi/polimerizzazione (indice $R_H = I_{1100\text{cm}^{-1}}/I_{1380\text{cm}^{-1}}$) della carta [1].

Questo protocollo diagnostico è stato applicato a diversi casi studio caratterizzando lo stato di conservazione/degrado di libri di diverse epoche. Come esempio in Figura 1 si riporta una immagine ottica di una parte di pagina di un libro del 1893 e le corrispondenti mappe 2D degli spettroscopici legati allo stato di idrolisi R_H ed allo stato di ossidazione O_I . Si osserva dalla Figura 1 come in questo caso, specialmente l'indice ossidativo O_I , presenti dei valori più elevati lungo una specifica fibra della carta che risulta più scura (presumibilmente più danneggiata) nella corrispondente immagine ottica. Inoltre, sono stati studiati gli effetti di trattamenti di pulizia innovativi (idrogel, irraggiamento con radiazione UV ed EUV) in collaborazione con il DICMA Sapienza e altri laboratori del Dipartimento FSN (FSN-PLAS-PAX, sezione Superconduttività).

2. Abstract

Nell'ambito della cura, del trattamento e della conservazione di beni librari, è stato sviluppato un protocollo diagnostico basato sulla spettroscopia Raman, tecnica non distruttiva e non invasiva, in grado di seguire l'evoluzione dei processi ossidativi e di idrolisi della carta, principali artefici del suo invecchiamento e del deterioramento.

3. Conclusioni

Il protocollo diagnostico basato su indici di spettroscopia Raman è stato applicato caratterizzando beni librari di diverse epoche ed ottenendo mappe bidimensionali che associano immagini ottiche ad immagini spettrali legate allo stato di ossidazione e di idrolisi della carta in esame. Tale protocollo

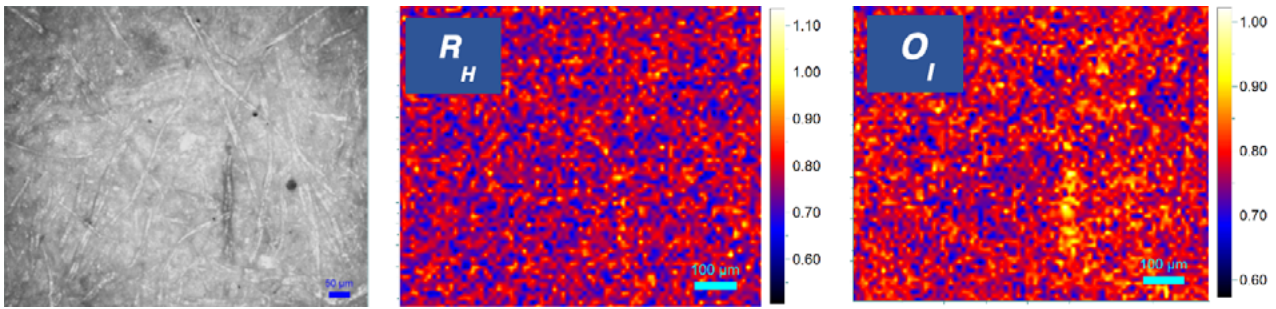


Figura 1: immagine ottica di parte di pagina di un libro del 1893 e le corrispondenti mappe 2D degli indici spettroscopici dello stato di idrolisi R_H e dello stato di ossidazione O_I

diagnostico risulta particolarmente interessante non solo per individuare lo stato di invecchiamento e degrado del bene librario di interesse storico/letterario, ma anche per studiare e sviluppare metodi innovativi di trattamento e cura.

4. Bibliografia

1. Botti, S.; Bonfigli, F.; Nigro, V.; Rufoloni, A.; Vannozzi, A., Evaluating the Conservation State of Naturally Aged Paper with Raman and Luminescence Spectral Mapping: Toward a Non-Destructive Diagnostic Protocol. *Molecules* 2022, 27, 1712. <https://doi.org/10.3390/molecules27051712>.

Analisi microstrutturali con approccio micro- e non distruttivo

D. Mirabile Gattia

ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-PROMAS-MATPRO

Corresponding author: daniele.mirabile@enea.it

Keywords: microstructural investigation, optical and electron microscopy, X-Ray diffraction

1. Abstract

Le tecniche di caratterizzazione microstrutturali consentono l'acquisizione di informazioni utili per lo studio dei materiali nell'ambito dei beni culturali. In particolare, la Microscopia Elettronica a Scansione (SEM) e la Diffrazione di Raggi X (XRD) possono essere utilizzate per indagini su diversi tipo di materiali, sia organici che inorganici. In questo lavoro vengono presentati, come esempio, alcuni dei risultati ottenuti nelle indagini di campioni provenienti dalla Villa della Piscina a Roma. I campioni, anche di notevoli dimensioni, sono stati studiati sia con un approccio micro-distruttivo che non distruttivo, mediante l'utilizzo di opportune condizioni di lavoro.

2. Introduzione e discussione

Le tecniche di indagine microstrutturali, quali la Microscopia Elettronica a Scansione e la Diffrazione di Raggi X, consentono lo studio di materiali sia organici che inorganici. Queste tecniche trovano applicazione in svariati settori, tra questi quello dei Beni Culturali. Le indagini richiedono in genere una preparazione del campione. Questo vale in particolare per le osservazioni al SEM che avvengono in condizioni di vuoto o di pressione parziale. In queste condizioni, nel caso di campioni non conduttivi, è possibile l'accumulo di cariche sulla superficie del campione che causano distorsioni dell'immagine. Nel caso di utilizzo di un diffrattometro di raggi X per polveri è invece necessario avere campioni in forma di polvere o campioni piani. Le misure possono essere condotte in aria o in un'atmosfera controllata, a seconda del tipo di materiale studiato.

I campioni della Villa della Piscina analizzati sono dei frammenti di affresco. Sono state effettuate delle osservazioni dirette al SEM della superficie dei campioni, in corrispondenza dei diversi pigmenti, utilizzando opportune condizioni operative del microscopio. In Figura 1 sono riportate le immagini acquisite, che hanno permesso di individuare, con il supporto dell'analisi EDS, due pigmenti, di granulometria differente, miscelati insieme (malachite e celadonite). Indagini analoghe sono state condotte su altri pigmenti [1].

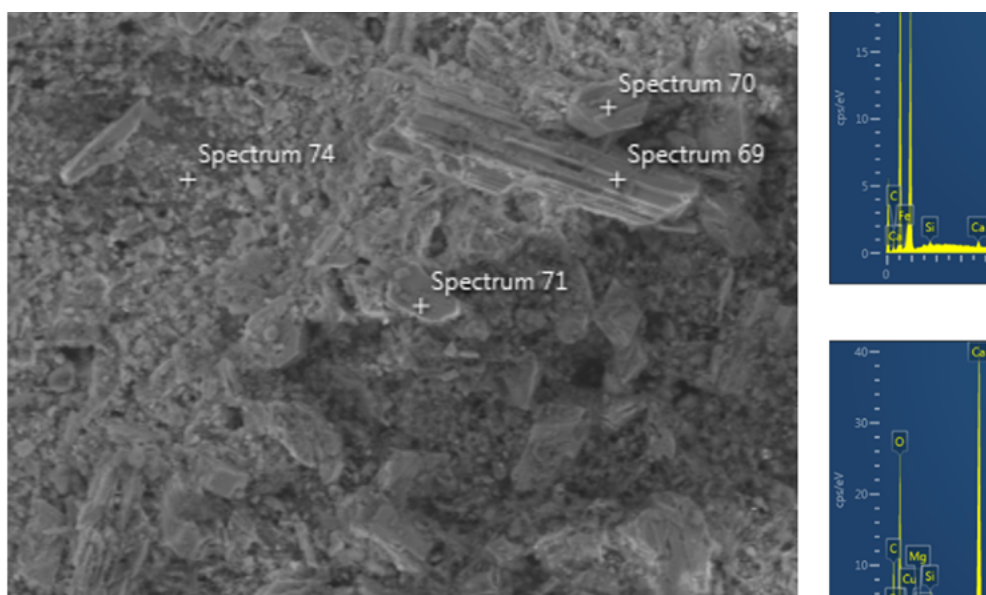


Figura 1: immagini SEM di particelle di malachite e celadonite di diversa granulometria (a); in (b) e (c) sono riportati gli spettri EDS dei due tipi di particelle

La Diffrazione di Raggi X ha permesso di individuare le fasi cristalline dei composti sia dei diversi pigmenti che, in alcuni casi, dello strato di stucco sottostante.

3. Conclusioni

Il lavoro riporta come due tecniche di caratterizzazione microstrutturali, la Microscopia Elettronica e la Diffrazione di Raggi X, possano essere utilizzate, in maniera sinergica, anche con un approccio non distruttivo, per l'osservazione diretta di campioni del patrimonio artistico.

4. Bibliografia

1. M. Sbroscia et al., *Microchemical Journal* 153 (2020) 104450

Studio dei dipinti mediante tecniche non distruttive. Due esempi particolari relativi all'impiego dell'XRF

C. Seccaroni

ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-PROMAS-MATPRO

Corresponding author: claudio.seccaroni@enea.it

Keywords: XRF, dipinti, bario, antimonio, zinco, pigmenti a base di rame, stronzio, gesso, strato di fondo

1. Introduzione

Il centro ENEA della Casaccia è stato tra i primi, anche in ambito internazionale, a dotarsi di un sistema per analisi XRF in situ. Dapprima si è operato con sorgenti radioisotopiche; successivamente, a partire dal 1988, ne è stato progettato e realizzato uno che faceva uso di un tubo radiogeno collimato, utilizzato sino al 2016, quando fu sostituito da uno più compatto di produzione industriale. In oltre 35 anni sono state indagate molte opere d'arte, in Italia e all'estero. In questa sede ci si soffermerà su due casi particolari in cui iniziali difficoltà di lettura sono state in seguito correttamente interpretate, mostrando limiti delle catene strumentali o dello stato delle conoscenze riguardo alla corretta lettura dei dati acquisiti.

La *Fornarina* di Raffaello, come molti dipinti famosi, è stata oggetto di attenzioni diagnostiche particolari, essendo stata sottoposta a indagini XRF nel 1983, 2000 e 2020. Nel primo e nel secondo caso sono state effettuate misure puntuali utilizzando sorgenti radioisotopiche nel 1983 e un tubo radiogeno nel 2000; nel 2020 è stata eseguita una scansione MA-XRF. Nel 1983 è stato individuato l'antimonio nell'area del turbante e riferito al contesto originale del dipinto¹, al contrario, il bario, sempre sul turbante, era stato interpretato come associato a una ridipintura ottocentesca. In ogni caso, per entrambi gli elementi non è stata eseguita una stima, seppur di massima, degli effettivi quantitativi in gioco, mentre a posteriori sappiamo che, alla luce dei rendimenti di fluorescenza, particolarmente elevati nelle condizioni strumentali e operative adottate, i loro limiti rivelabilità risultano molto spinti, al punto da consentirne l'identificazione anche in tracce minime.

Le misure effettuate nel 2000, con l'ormai raggiunta consapevolezza che si trattava di impurezze, hanno consentito di verificare l'esistenza di una correlazione tra i due elementi.

Sebbene non sia stato possibile produrre, a causa di limiti strumentali e operativi, delle mappe di concentrazione per antimonio e bario, la campagna MA-XRF del 2020 ha mostrato la presenza sistematica di rame e impurezze di zinco su tutta l'area del turbante. Incrociando i dati derivati dalle tre campagne è dunque possibile attribuire le impurezze di zinco, bario e antimonio al pigmento di rame utilizzato, verosimilmente l'azzurrite, compatibili con quanto noto riguardo a questo minerale².

Anche per la *Deposizione* di Raffaello nella Galleria Borghese siamo in presenza di più campagne XRF: in occasione del restauro ICR del 1966-72, poi nel 1983, 1995, 2004 e 2019. Le prime due campagne furono effettuate utilizzando sorgenti radioisotopiche, la terza e la quarta tubi radiogeni, la quinta MA-XRF. Sin dal 1983 ci si rese conto che sulla *Deposizione* le impurezze di stronzio, elemento associato al calcio e, di conseguenza, al gesso di preparazione dei supporti, apparivano decisamente superiori rispetto alla media riscontrata su altri dipinti su tavola, il che comportava o spessori maggiori degli strati preparatori o un gesso più ricco di tali impurezze. Nel 2019 la lettura delle mappe MA-XRF incrociata con radiografie, riflettografie a diversa lunghezza d'onda e un attento studio del supporto indicò che la distribuzione dell'elemento subiva variazioni di concentrazione nelle aree in cui il supporto presentava giunzioni o difetti strutturali, portando alla conclusione che

¹ Il giallo di Napoli (antimoniato di piombo), salvo rare eccezioni, non è coerente con un contesto cinquecentesco.

² Cfr. A. Cosma, C. Merucci, S. Ridolfi (a cura di), *Raffaello da vicino. Nuove indagini e nuove scoperte sulla Fornarina*, Roma 2023.

prima di iniziare a dipingere l'artista avesse rimosso parzialmente gli strati preparatori al fine di risanare l'apertura di giunzioni tra le assi e sollevamenti del gesso in prossimità di nodi. Ciò avvenne utilizzando un gesso con differenti tenori di impurezze di stronzio rispetto a quello precedentemente impiegato, il che non comporta una differente origine, poiché le impurezze di stronzio risultano altamente variabili anche all'interno di uno stesso giacimento.

Essendo localizzato in profondità, il contributo dello stronzio risulta parzialmente schermato dagli strati pittorici soprastanti, e ciò può fornire una stima, seppur grossolana e indiretta, dello spessore dagli strati pittorici soprammessi. Da tempo era nota la presenza di un importante pentimento, concernente l'eliminazione di una figura al centro, in corrispondenza dello sfondato paesistico. Le mappe MA-XRF dello stronzio hanno mostrato in maniera accurata il pentimento ed è stato possibile dedurre che il pittore ha disegnato sul gesso questa figura, stendendo poi i primi strati di colore nell'adiacente paesaggio ma non sulla figura stessa; una volta deciso di eliminarla ha coperto tutto con le successive stesure pittoriche del paesaggio³.

Dunque, l'interpretazione di un risultato, o la semplice possibilità di ottenerlo, è strettamente associata alle caratteristiche strumentali e operative, oltre che alle conoscenze e alle capacità interpretative degli operatori, e che per un esito ottimale è necessario integrare competenze e informazioni derivate da contesti conoscitivi e diagnostici più ampi.

2. Abstract

Il testo si concentra su due casi di studio relativi all'analisi XRF di dipinti su tavola. Il primo esempio mostra come siano state ottenute informazioni integrate su un pigmento blu a base di rame, grazie all'integrazione di campagne di misura durate circa 40 anni. Infatti, l'uso di sorgenti radioisotopiche o di tubi a raggi X comporta sensibilità e limiti di rilevazione diversi. L'integrazione finale è stata possibile grazie alla MA-XRF, i cui limiti di rilevazione sono inferiori alle misure puntuali. Il secondo esempio mostra come lo studio delle impurità sistematiche di stronzio nel gesso degli strati di terra possa fornire informazioni sulla rilavorazione del supporto del pannello e, considerando l'effetto scudo, fornire una lettura visiva della presenza di un pentimento.

³ Cfr. R. Alberti, et al., *From noise to information. Analysing macro-XRF mapping of strontium impurities in Raphael's Baglioni Entombment in the Galleria Borghese, Rome*, 'Journal of Cultural Heritage', vol. 58, November–December 2022, pp. 130-136. ISSN 12962074; DOI:10.1016/j.culher.2022.10.001.

Applicazioni della spettroscopia Raman nel campo dei Beni Culturali

A. Puiu

ENEA, C.R. Frascati, FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: adriana.puiu@enea.it

Keywords: beni culturali, spettroscopia Raman, analisi non-distruttiva, pigmenti, restauro.

Abstract

Il Laboratorio di Diagnostica e Metrologia dell'ENEA di Frascati ha esperienza pluriennale in vari campi di applicazioni diagnostiche della spettroscopia Raman, in particolare nel campo dei Beni Culturali. Nel presente lavoro riportiamo una descrizione dell'apparato Raman trasportabile in dotazione al nostro laboratorio utilizzato in-situ, e alcuni dei risultati ottenuti nel corso delle varie campagne di misura svolte nell'ambito di progetti di ricerca finanziati dalla Regione Lazio (ad es. Progetto ADAMO e Progetto COBRA).

1. Introduzione

La presenza dell'ENEA nel campo dei Beni Culturali si manifesta soprattutto attraverso i risultati ottenuti utilizzando tecniche ottiche spettroscopiche a scopo diagnostico, un'attività che ben caratterizza la 'mission' del laboratorio di Diagnostiche e Metrologia del Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare dell'ENEA di Frascati. Nello specifico il presente report nasce da un'intensa applicazione sperimentale sia in laboratorio che in-situ della spettroscopia Raman, tecnica ottica intrinsecamente non-distruttiva, a vari casi di problematiche presentate da opere d'arte importanti quale affreschi antichi presenti in varie Chiese e Catacombe [1-3]. Per rispondere ai quesiti posti era stato richiesto l'uso di un metodo non-distruttivo per l'identificazione dei pigmenti allo scopo di valutare lo stato di conservazione dell'opera, o l'originalità dei colori, o una eventuale stratificazione dei ritocchi, o anche per decidere il pigmento ideale da utilizzare in una mirata e accurata opera di restauro. La spettroscopia Raman è una tecnica ottica non-distruttiva per l'analisi molecolare basata sullo scattering inelastico della luce laser in cui vengono rivelate le differenze tra frequenza della luce incidente e quella della luce diffusa, differenze corrispondenti all'eccitazione di specifici moti vibrazionali. Misurando l'intensità della luce diffusa in funzione delle differenze di frequenza si ottiene uno spettro Raman che rivela informazioni sulla struttura chimica delle molecole.

2. Risultati e discussione

Tra i casi presi in considerazione dal nostro Laboratorio rientra l'abside della Chiesa di San Nicola in Carcere di epoca medioevale, affrescato da Vincenzo Pasqualoni tra il 1865 e 1866, per il quale siamo riusciti ad identificare i pigmenti della manica rossa e delle tuniche rosa degli angeli, ovvero i composti chimici Fe_2O_3 , PbCrO_4 e CaCO_3 utilizzati in proporzioni diverse per ottenere tonalità diverse di rosa e di rosso, basandoci sulla assegnazione dei picchi Raman emergenti nello spettro delle aree indagate ai composti chimici di base [1]. L'apparato Raman trasportabile (modello i-Raman della BWTek Inc) è stato utilizzato in-situ per le campagne di misura. Sullo stesso affresco abbiamo rilevato la presenza di ocre gialla (goethite $\alpha\text{-FeOOH}$) ottenuta per realizzare i pigmenti arancioni e gialli, nonché la presenza di gesso (CaSO_4) e ossido di cromo (Cr_2O_3) utilizzati per ottenere i pigmenti della manica verde (Figura 1). In molti casi, la presenza di un elevato fondo di fluorescenza non ci ha permesso di evidenziare picchi Raman riconducibili al pigmento utilizzato.

Altri esempi di casi trattati sono gli affreschi G6 e G15 presenti nelle Catacombe di S. Alessandro di Epoca Romana, complesso monumentale scoperto mediante scavi archeologici nel 1854, e la Tomba dei Demoni Azzurri di Epoca Etrusca di recente scoperta nella Necropoli di Monte Rozzi (Tarquinia, VT) che risale al IV secolo a.C., nella quale pigmenti di vari colori rosso, blu e verde sono stati utilizzati per rappresentare le figure demoniache infestanti la scena. Anche in questi

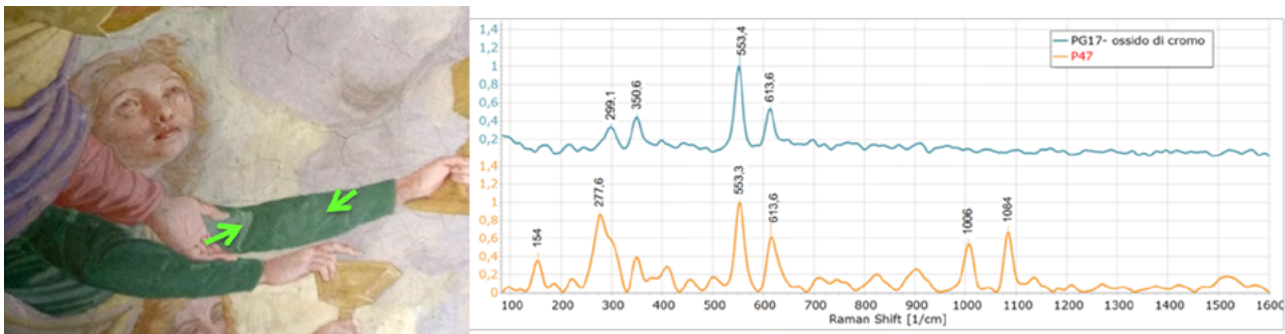


Figura 1: Abside della Chiesa di S. Nicola in Carcere, analisi dei pigmenti verdi (spettri Raman del pigmento verde sull'affresco a confronto con il pigmento PB47 - Cr₂O₃).

casi il corretto uso della spettroscopia Raman ci ha consentito di identificare composti chimici di base. Infine, abbiamo avuto l'opportunità di caratterizzare alcuni materiali sulla superficie di opere marmoree, in particolare il Sarcofago delle due Oranti nel Museo dei Sarcofagi delle Catacombe di San Sebastiano; in questo caso il materiale usato nel restauro precedente per la stuccatura è risultato l'araldite, una colla epossidica che polimerizza a temperatura ambiente. Inoltre, abbiamo analizzato il busto del Cardinale Flavio Chigi realizzato da Bernardo Fioriti e conservato nel Palazzo Chigi di Ariccia, gli spettri Raman delle aree analizzate sono risultati più simili allo spettro di una miscela di cera d'api e carnauba piuttosto che a singoli composti. Citiamo infine la possibilità di identificazione di biodegrado, su reperti archeologici di marmo aggredito da cianobatteri, tramite l'assegnazione di opportuni picchi Raman a sostanze come clorofilla e antrachinone.

3. Conclusioni

In conclusione, grazie ai suoi vantaggi (i.e. rapidità della misura, specificità molecolare, non-invasività, non richiede alcuna preparazione del campione ed è compatibile con operazioni in fibra ottica per studi in-situ) la spettroscopia Raman può essere applicata con successo per l'analisi di una moltitudine di materiali di interesse artistico e archeologico come materiali lapidei, materiali pittorici (pigmenti, coloranti, inchiostri), legno, ceramica, vetro, reperti gemmologici, materiali di restauro, etc.

4. Bibliografia

1. M. Romani et al., Analytical chemistry approach in cultural heritage: the case of Vincenzo Pasqualoni's wall paintings in S. Nicola in Carcere (Rome), *Microchemical Journal*, 156 (2020) 104920, ISSN 0026-265X, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104920>.
2. M. Romani, et al., Raman and Time-Gated-Lif Spectroscopy for the Identification of Painting Materials, *J Appl Spectrosc* 86 (2019) pp.360–368, <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00826-0>
3. S. Almviva et al., Raman/XRF/EDX microanalysis of 2nd-century stuccoes from Domus Valeriorum in Rome, *Journal of Cultural Heritage* 37 (2019) pp. 225-232, ISSN 1296-2074 <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.11.004>.

Diagnostica del legno antico in opera e in laboratorio

B. Carpani, G. Marghella, A. Marzo, C. Tripepi

ENEA, C.R. Casaccia, SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: anna.marzo@enea.it

Keywords: rilievi in sito; strutture in legno; elementi in legno antico; identificazione strutturale; test ND

1. Introduzione

Le strutture in legno svolgono un ruolo molto importante negli edifici monumentali in quanto buona parte di solai e coperture erano realizzate in legno, soprattutto per coprire grandi luci. Essendo strutture complesse, l'identificazione degli schemi statici e la conoscenza dei materiali sono elementi basilari ai fini della loro conservazione. A questo proposito, sono stati effettuati diversi studi che hanno portato alla massa a punto di una metodologia di indagine adeguata [1,2], basata sulle seguenti fasi. Innanzitutto, un'indagine visiva approfondita e un rilievo geometrico dettagliato, seguiti da indagini *in situ* non distruttive (ND); Successivamente, sugli elementi eventualmente rimossi, test distruttivi di laboratorio. Nei paragrafi seguenti sarà illustrata sinteticamente, l'applicazione della metodologia di cui sopra a due casi studio.

2. Abstract

L'identificazione strutturale delle travi lignee della torre di Montorio, nell'Appennino bolognese (Italia) [3,4] è stata sviluppata in due fasi (Figura 1): indagini non distruttive in situ e prove in laboratorio, distruttive e non distruttive. Le indagini in situ sono consistite in analisi igrometriche, ultrasoniche (US), sclerometriche (S) e resistografiche (R), mentre in laboratorio sono state eseguite prove di flessione fino a rottura. In entrambi i casi sono state effettuate preliminarmente indagini visive e geometriche approfondite, per la classificazione a vista degli elementi.

Allo scopo di preservare il sito archeologico di Pompei (5) (sito UNESCO), l'ENEA, in collaborazione con la Soprintendenza di Pompei, ha analizzato lo stato di conservazione delle strutture di copertura della "Villa dei Misteri". La campagna di indagine in situ ha riguardato l'intero sistema di coperture (in legno, r.c. e acciaio) realizzato negli ultimi anni a protezione dei resti della villa (Figura 2).

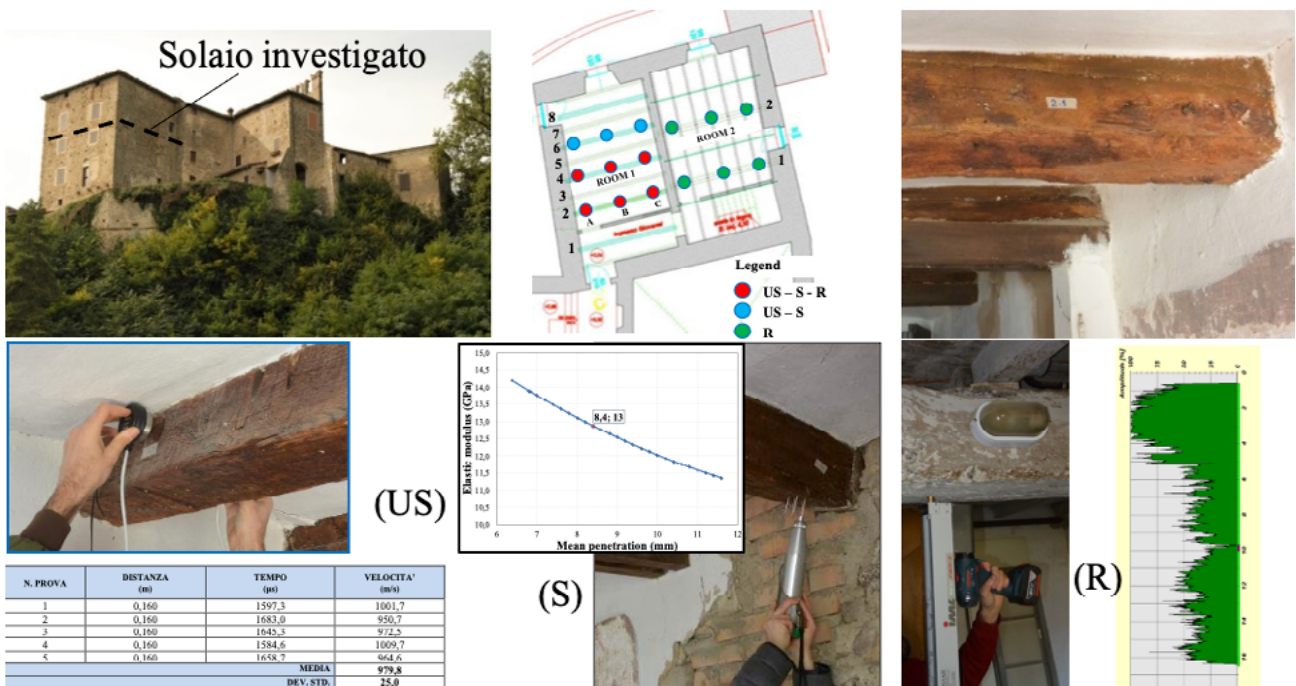


Figura 1: Indagini in situ ND sulle travi lignee della Torre di Montorio (Bologna)

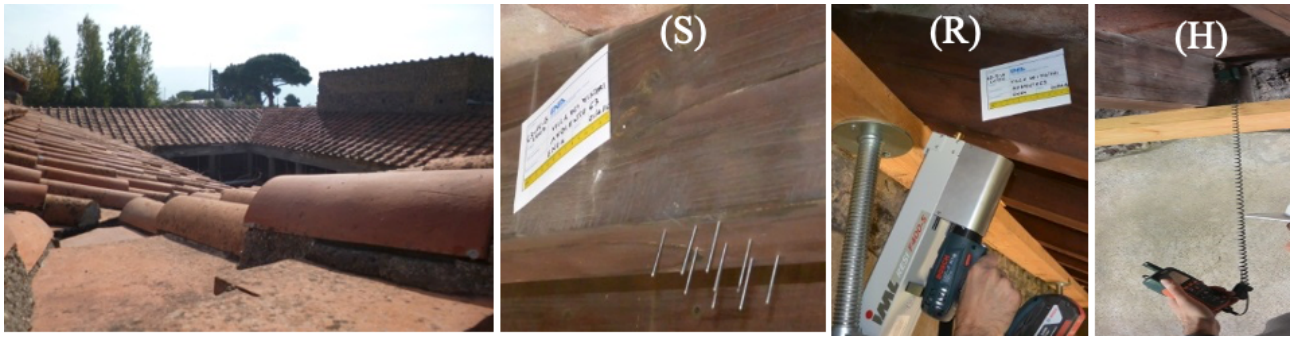


Figura 2: Indagini in sito ND delle strutture di copertura di Villa dei Misteri (Pompei).

3. Conclusioni

Sulla base delle buone correlazioni ottenute tra gli esiti delle indagini non distruttive e distruttive, le tecniche non distruttive risultano essere un utile complemento alla classificazione a vista tradizionale. Permettono un'identificazione meccanica affidabile, degli elementi in legno, (finalizzata alle applicazioni pratiche) portando alla corretta valutazione dell'integrità delle strutture.

4. Bibliografia

1. Faggiano, B., Marzo A., & Mazzolani F.M., The Diplomatic Hall of the Royal Palace of Naples: Structural characterization of the timber roof by in situ ND investigations. *Construction and Building Materials*. 171 (2018). DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.174
2. Faggiano, B., Marzo A., Grippa M.R., Iovane G., Mazzolani F.M., & Calicchio D. The inventory of structural typologies of timber floor slabs and roofs in the monumental built heritage: the case of the Royal Palace of Naples. *International Journal of Architectural Heritage*. 12, 683- 709 (2018). DOI: 10.1080/15583058.2018.1442525
3. Carpani B., "The Restoration of the Tower of Montorio, Italy, after the 2003 earthquake", *EAI*, 3-4, 2013, ENEA, pp. 52-63, DOI: 10.12910/EAI2013-08, 2013.
4. Marzo A., Marghella G., Tripepi C., Bruni S., Carpani B. "ND in situ tests and laboratory experimental campaign on the timber beams of the tower of Montorio in Bolognese Apennines". 3rd International Conference on protection of historical construction (PROHITECH), Lisbona 2017, ISBN: 978-989-8481-58-0
5. Bergamasco I., Marzo A., Marghella G., Carpani B., "In-situ experimental campaign on the covering structures of "Villa dei Misteri" in Pompeii". *Journal of Civil Structure Health Monitoring* (2018) Springer. ISSN 2190-5452, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0274-7>

Caratterizzazione di materiali e pigmenti mediante SEM

G.Marghella, S.Bruni, A.Gessi

ENEA – C. R. Casaccia - SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: giuseppe.marghella@enea.it

Keywords: Microscopia elettronica a scansione, microanalisi EDS

1. Introduzione

Il laboratorio di microscopia elettronica di SSPT-MET-DISPREV, presso il centro ENEA di Bologna, è attrezzato con un microscopio Quanta Inspect S per l'osservazione dei campioni accoppiato ad una microanalisi Oxford Instruments Xplore per la loro caratterizzazione chimica. Questo strumento permette di analizzare in maniera non distruttiva oggetti di dimensioni fino ad alcuni centimetri senza alcuna preparazione, con ingrandimenti che possono arrivare in condizioni ottimali a 20.000X.

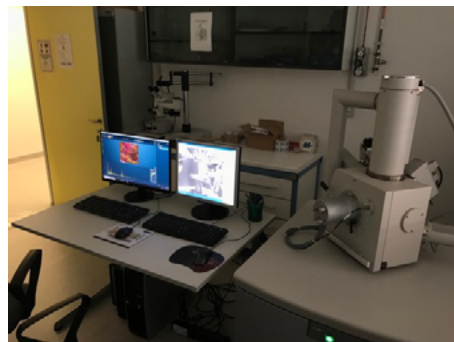


Figura 1: il laboratorio di microscopia elettronica

Queste caratteristiche rendono lo strumento particolarmente adatto per lo studio di oggetti di interesse storico artistico, come ad esempio monili, gioielli, monete, di micro-campioni di materiale prelevati quando possibile dalle opere d'arte e di prodotti di degrado come incrostazioni o prodotti di corrosione.

In particolare, negli ultimi anni sono stati caratterizzati campioni di fibre tessili, pigmenti, frammenti prelevati da strumenti musicali, vetrate, elementi architettonici.

2. Casi di studio

In Figura 2 è possibile osservare una fibra di lana prelevata da un tessuto risalente al XIII secolo, che è stato analizzato per valutare lo stato di conservazione. Lo studio ha permesso di stabilire che le fibre di colore più chiaro erano ben conservate, al contrario di quelle più scure che presentavano dei danneggiamenti dovuti a probabili attacchi fungini.

In Figura 3 è riportata l'immagine al SEM di una sezione lucida degli strati pittorici presenti su un dipinto su tela del XVIII secolo attribuito a Gaetano Gandolfi. Le microanalisi sui differenti strati hanno permesso di individuare sia la natura della preparazione a gesso e colla che i pigmenti impiegati per la realizzazione del dipinto, il bianco di piombo (di colore più chiaro nell'immagine), il minio e differenti ossidi di ferro per i rossi (in basso).

La Figura 4 mostra un frammento ligneo prelevato dalla cassa armonica della preziosa arpa Barberini, le cui caratteristiche hanno permesso di identificare nell'acero la specie di provenienza del legno impiegato per la realizzazione dello strumento.

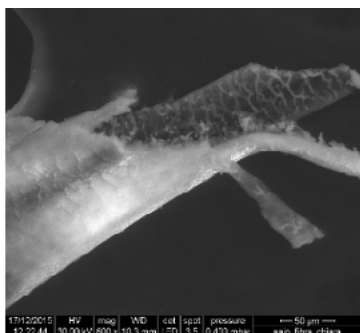


Figura 2: fibra di lana

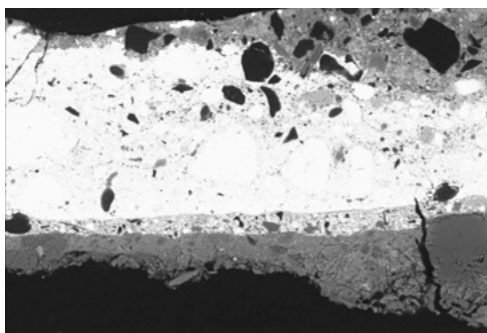


Figura 3: strati pittorici

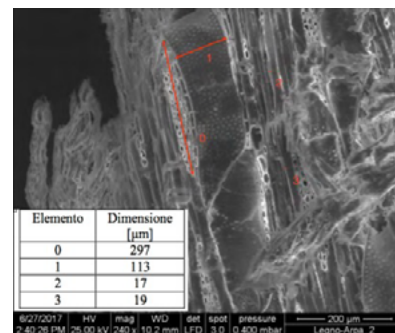


Figura 4: frammento di legno

3. Conclusioni

I casi studio brevemente illustrati evidenziano le grandi potenzialità dell'impiego della microscopia elettronica per lo studio dei materiali costituenti i beni culturali, in particolar modo la versatilità della tecnica, applicabile ad un'ampia tipologia di campioni.

Caratterizzazione dei materiali dei Beni Culturali mediante fluorescenza indotta da laser(LIF)

L. Caneve

ENEA, C. R. Frascati, FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: luisa.caneve@enea.it

Keywords: Fluorescenza Indotta da Laser, LIF, Beni Culturali.

1. Abstract

La tecnica spettroscopica di fluorescenza indotta da laser (LIF) è ampiamente utilizzata per l'analisi diagnostica nel campo dei Beni Culturali. L'analisi spettrale della radiazione proveniente dalla superficie esaminata fornisce informazioni sulla composizione dello strato superficiale. Diversi strumenti basati su tale tecnica sono stati sviluppati nel Laboratorio Diagnostiche e Metrologia (DIM) di ENEA Frascati e applicati *in situ* su opere di diverso materiale.

2. Introduzione

Nell'ambito delle attività multidisciplinari che ENEA svolge rivolte alla conoscenza, conservazione, fruizione e valorizzazione del patrimonio culturale del Paese, il Laboratorio Diagnostiche e Metrologia di Frascati ha sviluppato sensori LIF a scansione, facilmente trasportabili, operanti a distanza e non invasivi [1,2]. Tali strumenti permettono di mappare i materiali superficiali, individuando e localizzando materiali diversi utilizzati, ad esempio, per operazioni di restauro, quali integrazioni e rifacimenti, succedutesi nel tempo [3]. Ciò è permesso anche grazie all'utilizzo di algoritmi sviluppati ad hoc ed applicati nel processo di data post-processing [4]. La tecnica è applicabile a materiali di diverso tipo utilizzati nei Beni Culturali, come marmo, legno, pittura murale, attacchi biologici e materiali organici e inorganici di restauro. L'analisi diagnostica mediante i sensori LIF della statua dell'ARES Ludovisi a Palazzo Altemps a Roma, per esempio, ha permesso di evidenziare inserti di marmi differenti in alcune aree della statua stessa (Figura 1).

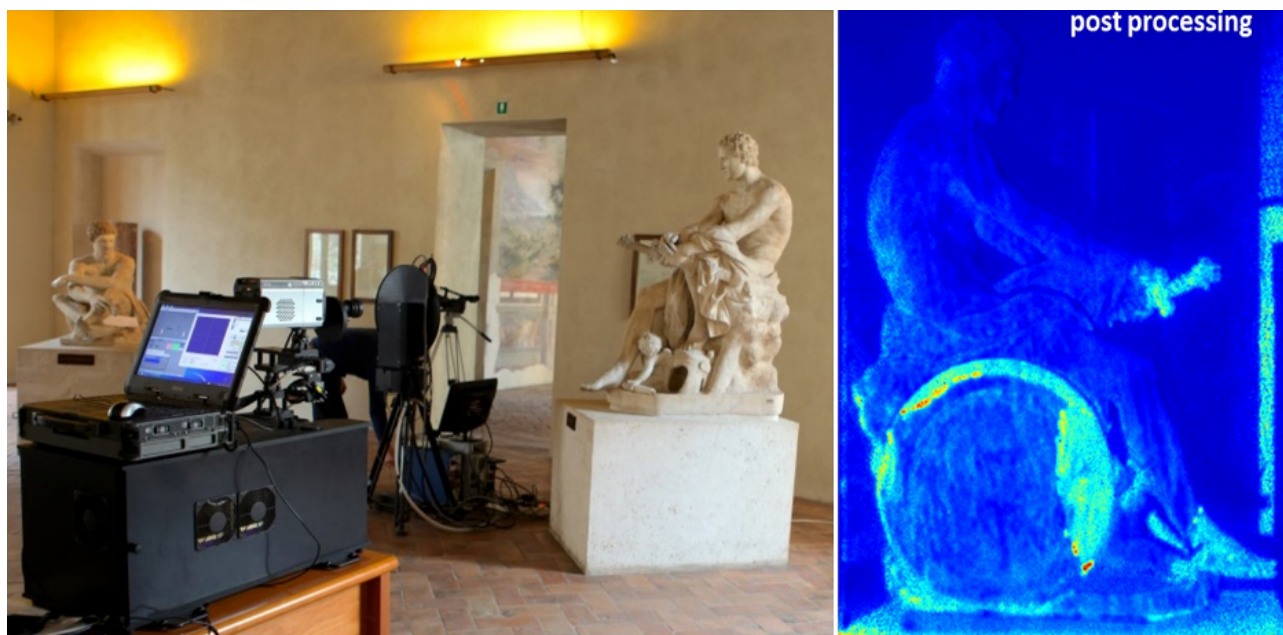


Figura 1. Sensori LIF a Palazzo Altemps (sinistra); immagine LIF dell'Ares Ludovisi dopo l'elaborazione dei dati (destra).

3. Conclusioni

I sensori LIF sviluppati da ENEA costituiscono un sistema di indagine rapido, non distruttivo, utilizzabile *in situ* e quindi risultano particolarmente vantaggiosi per applicazioni nel campo dei

Beni Culturali. I risultati ottenuti sono il frutto del lavoro di squadra all'interno del Laboratorio Diagnostiche e Metrologia.

4. Bibliografia

1. F. Colao, L. Caneve, R. Fantoni, L. Fiorani, A. Palucci, Lasers in the Conservation of Artworks, in: M. Castillejo, P. Moreno, M. Oujja, R. Radvan, J. Ruiz (Eds.), Boca Raton, US, 2008
2. L. Caneve, F. Colao, M. Del Franco, A. Palucci, M. Pistilli, V. Spizzichino, 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 (November 16, 2016 <http://dx.doi.org/10.1117/12.2240924>)
3. L. Caneve, F. Colao, R. Fantoni, L. Fiorani, Scanning lidar fluorosensor for remote diagnostic of surfaces, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 720 (2013) 164–167.
4. V. Spizzichino, L. Bertani, L. Caneve, Origin determination of mediterranean marbles by laser induced fluorescence, M. Ioannides et al. (Eds.): EuroMed 2018, LNCS 11196, pp. 212–223, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01762-0_18

ATTIVITA' ENEA PER I BENI CULTURALI

Strategie e strumenti per la gestione e valorizzazione integrata del patrimonio archeologico in aree urbane periferiche

B. Calosso

ENEA – C. R. Frascati - TERIN-ICT-HPC

Corresponding author: beatrice.calosso@enea.it

Keywords: archeologia, rigenerazione urbana, pianificazione territoriale, restauro.

1. Introduzione

La funzione storicizzata data dalla continuità d'uso [1], che nei secoli ha colmato di significati i resti archeologici stratificati nel centro città, manca nella maggior parte delle rovine nelle aree periferiche del settore sudorientale di Roma. Qui i ruderi si presentano isolati in aree ex-agricole, chiusi in recinti [2], circondati dal costruito, abbandonati e perciò privati di qualsiasi connessione col contesto contemporaneo, con la conseguente perdita di riconoscibilità del proprio valore storico-culturale. La ricerca condotta nell'ambito di un dottorato ha inteso identificare un approccio metodologico a supporto di futuri interventi di restauro e valorizzazione di rovine in aree densamente urbanizzate, che implicasse la replicabilità di alcune strategie di gestione, integrabili nei piani di rigenerazione urbana previsti dal Piano Regolatore vigente.

2. La metodologia elaborata

Nell'indagine svolta si è scelto di procedere da una prima considerazione di tipo semantico: il rudere oggi assume significato in quanto tassello di una memoria collettiva [3], propria della comunità che abita un territorio. Tale attribuzione deriva da un percorso di conoscenza stratigrafica, che deve procedere considerando le vestigia parte integrante della storia di un quartiere nella sua complessità culturale e che termina con la riconnessione della testimonianza archeologica all'intero del Sistema Culturale-Territoriale [4]. Sul piano pratico, tale processo si concretizza in un nuovo approccio alla pianificazione della gestione del bene archeologico suburbano [5], in cui i cittadini, assieme agli enti preposti alla pianificazione urbana e agli esperti della materia, assumono un ruolo proattivo in tutte le fasi. La gestione si definisce 'integrata' poiché combina conservazione e valorizzazione e ha come obiettivo – e come difficoltà maggiore – aggiornare le azioni volte alla riconnessione della rovina con un tessuto urbano-sociale in continua trasformazione, come quello periferico romano. Scopo della ricerca svolta è stato, pertanto, elaborare una metodologia per selezionare tra le più recenti strategie di gestione integrata, applicate in interventi di restauro realizzati in ambito europeo, quelle in grado di superare la concezione ottocentesca, tuttora predominante, che predilige come misure di tutela l'isolamento delle vestigia, o il loro interro [6]. Per vagliare l'integrabilità delle strategie individuate nella reale situazione romana, seguendo le linee guida UNESCO [7], è stata applicata la metodologia di analisi SWOT che consente di valutare punti di forza, di debolezza, opportunità, rischi e minacce di un determinato sito in relazione al suo contesto. Nello specifico, l'analisi ha preso in esame i progetti di rigenerazione urbana previsti nel Piano Regolatore Generale vigente (2008) per le periferie (*Città da Ristrutturare* [8] e *Centralità Locali* [9]), coerentemente all'approccio metodologico riconosciuto, a livello internazionale, per l'integrazione di interventi per la conservazione e valorizzazione di siti culturali in una pianificazione urbana sostenibile, che attribuisca loro il ruolo di 'motore' della rivitalizzazione urbana [10].

3. Conclusioni

La SWOT applicata ai quartieri in fase di rigenerazione ha, infine, permesso di individuare le strategie più adatte alle peculiarità di circa 100 siti censiti durante il dottorato, ciascuno in relazione allo specifico sistema culturale-territoriale. Se ne è dedotto che le strategie *Ecomuseo* [11] ed *Museo Diffuso* [12] risultano tra le più efficaci nel coniugare le esigenze di conservazione, fruizione e conoscenza¹³ delle rovine, distribuite nella periferia romana sudorientale, ai bisogni di riqualificazione di quest'ultima e

della cittadinanza che vi abita.

4. Bibliografia

1. D. Manacorda, *Archeologia in città fra ricerca, tutela e valorizzazione*, in Atti del Convegno Emergenza sostenibile. Metodi e strategie per l'archeologia urbana, Bologna, 27 March 2009, in *Groma*, 3, 2010.
2. A. Ricci, *Attorno alla nuda pietra: archeologia e città tra identità e progetto*, Donzelli, Rome, 2006.
3. M. Halbwachs, *La memoria collettiva*, Unicopli, Milan, 2001.
4. F. Mangoni di Santo Stefano, *La costruzione dei sistemi culturali territoriali*, Edizioni scientifiche Italiane, Napoli, 2009.
5. L. Manfra (a cura di), *Il Teatro Romano di Ferento. Un progetto di gestione per la valorizzazione di un sito del Lazio*, Gangemi Editore, 2012.
6. A. Ricci, *I mali dell'abbondanza, considerazioni impolitiche sui beni culturali*, Lithos, 1996.
7. The applicability of the SWOT analysis in the specific field is deduced from the guidelines for the management and enhancement of UNESCO sites WHC- 11/18.GA/11, Future of the World Heritage Convention, Paris, 1 August 2011: whc.unesco.org/115441; Project to define a model for the realization of the Management Plans of the UNESCO sites, Ministry of Heritage and Cultural Activities, Ernst & Young Financial Business Advisor S.p.A., Rome, January 2005.
8. Reference plans for the city to be restored. Rome City Council decides on adoption, March 2003 (http://www.urbanistica.comune.roma.it/images/uo_urban/prg_adottato/I1.pdf) (2022)
9. Master plan, Reference scheme for local centres, Municipality of Rome 2003 http://www.urbanistica.comune.roma.it/images/uo_urban/prg_adottato/I2.pdf (2022)
10. With the adoption of the 2030 Agenda for Sustainable Development, the international community and UNESCO have recognised the role of culture as a driver of sustainable development and urban revitalisation based on Cultural Heritage (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000264687>)
11. C. Grasseni, *Ecomuseo-logie. Interpretare il patrimonio locale, oggi*, in *Ecomuseo-logie. Pratiche e interpretazioni del patrimonio locale*, Guaraldi, 2010, pp. 9-18.
12. A. Tricoli, *Siti archeologici urbani: Integrare/Proteggere/Evidenziare/Rilevare*, in *Mostrare L'Archeologia. Per un manuale-atlante degli interventi di valorizzazione*, edited by M. Vaudetti et al., Allemandi & C., 2013, pp. 61-74.
13. P. Diaz Pedregal, *Sites Archéologiques et Conservation*, in *Urban Pasts and Urban Futures: Bringing Urban Archaeology to Life Enhancing Urban Archaeological Remains*, International and Interdisciplinary Symposium, Bruxelles, 2005, pp. 29-35.

Idrogel per la microestrazione di coloranti da substrati pittorici e tessili

V. Nigro

ENEA - C.R. Frascati - FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: valentina.nigro@enea.it

Keywords: idrogel, microestrazione, spettroscopia UV-Vis-NIR

1. Introduzione

La possibilità di identificare in modo non invasivo sostanze organiche su substrati pittorici o tessili è una delle sfide principali per i beni culturali, soprattutto nel caso in cui siano presenti in piccole quantità o tendano a dissolversi. Le proprietà di assorbimento e rilascio degli idrogel hanno reso tali materiali particolarmente interessanti per microestrazione non-invasiva di pigmenti. Gli idrogel sono infatti reti polimeriche tridimensionali in grado di assorbire grandi contenuti di acqua e negli ultimi anni hanno attirato particolare interesse per applicazioni nei beni culturali.

2. Abstract

L'Agar-gel, idrogel costituito da un polisaccaride naturale, è stato recentemente proposto per l'identificazione non invasiva di sostanze organiche attraverso microestrazione e come successivo substrato per misure SERS. Per caratterizzarne l'efficienza, è stato portato avanti uno studio sistematico combinando diverse tecniche in collaborazione con il Dr. A. Ciccola del Dipartimento di Chimica dell'Università La Sapienza.

In particolare, spettri di trasmittanza nel range UV-Vis-NIR sono stati raccolti per campioni di Agar-gel a diverse concentrazioni prima e dopo l'estrazione da provini pittorici e tessili preparati con lacca di robbia. Dopo l'estrazione si è osservata una riduzione significativa della trasmittanza del gel indice dell'assorbimento di composti aggiuntivi estratti dalla superficie del provino. Gli spettri di Agar-gel dopo l'estrazione hanno infatti mostrato un'ampia banda di assorbimento tra 480 nm e 550 nm, dovuta alle transizioni elettroniche dei gruppi carbonile nel cromoforo alizarina presente nella robbia [1], e una maggior capacità di estrazione del pigmento dal provino pittorico piuttosto che dal provino tessile [2]. Tali test hanno permesso di valutare le performance di gel a diverse concentrazioni ed è stato possibile individuare una concentrazione ideale per l'applicazione su un frammento tessile campionato da una passamaneria del dipinto del XIX secolo ritrovato nell'Ospitale Santa Francesca Romana (Fig.1(a)). Gli spettri di trasmittanza UV-Vis dell'Agar-gel dopo l'estrazione del pigmento hanno mostrato una riduzione tra 500 nm e 550 nm attribuita al segnale caratteristico della robbia, anche grazie al confronto con gli spettri di riferimento dai provini (Fig.1(b)).

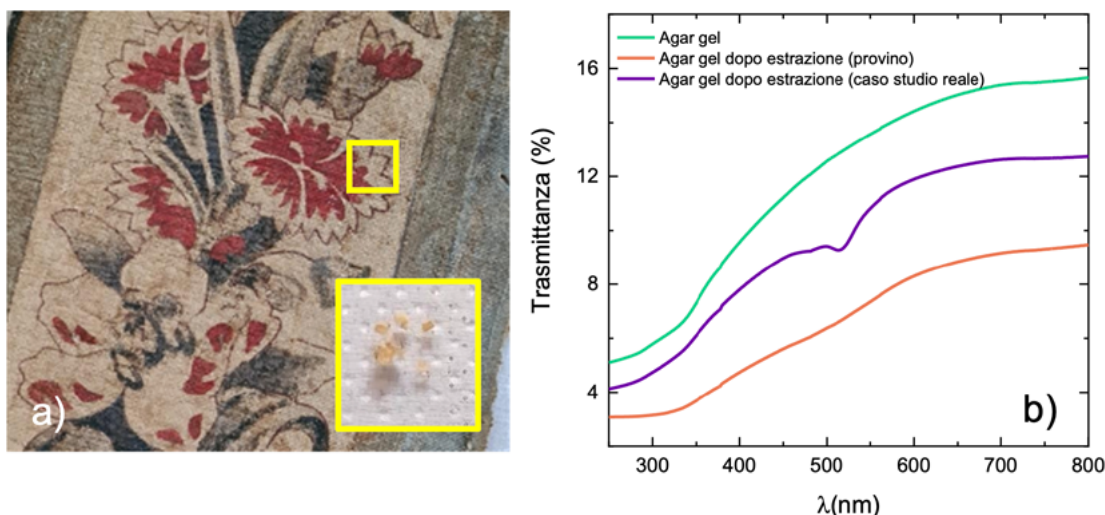


Figura 1: (a) Frammento tessile da una passamaneria del XIX secolo e (b) spettri di trasmittanza UV-Vis per Agar-gel a $C_w = 3\%$, prima e dopo l'estrazione dal provino pittorico e dal frammento tessile del XIX secolo.

3. Conclusioni

Attraverso spettroscopia UV-Vis è stato possibile identificare la presenza della robbia all'interno della matrice gel confermandone la possibilità di utilizzo per estrazioni micro-invasive. Inoltre, è stato possibile individuare alcune proprietà fisiche della rete gel strettamente legate alla capacità di estrazione: la capacità di rilascio della soluzione estraente, con conseguente estrazione del pigmento, può essere facilmente controllata modificando la concentrazione di Agar. Tale studio ha permesso di individuare le caratteristiche ideali per applicazioni su manufatti preziosi provenienti dalla tomba del faraone Tutankhamun [2].

4. Bibliografia

1. A. Bosi, A. Ciccola, I. Serafini, G. Peruzzi, V. Nigro, P. Postorino, R. Curini, G. Favero, Gel microextraction from hydrophilic paint layers: A comparison between Agar-gel and Nanorestore Gel® HWR for spectroscopic identification of madder *Microchemical Journal* (2023) 187, 108447.
2. G. Peruzzi, A. Ciccola, A. Bosi, I. Serafini, M. Negozio, N.M. Hamza, C. Moricca, L. Sadori, G. Favero, V. Nigro, P. Postorino, R. Curini, Applying Gel-Supported Liquid Extraction to Tutankhamun's Textiles for the Identification of Ancient Colorants: A Case Study *Gels* (2023) 9, 514.

RGB-ITR e IR-ITR: due prototipi di laser scanner per la fruizione, lo studio, il monitoraggio e la diagnostica dei Beni Culturali

M. Francucci, M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Ciaffi, M. Nuvoli, M. Pistilli

ENEA - C.R. Frascati - FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: massimo.francucci@enea.it

Keywords: laser scanner, imaging 3D, riflettografia IR

1. Introduzione

L'accessibilità, fruizione, diagnostica e il monitoraggio dei Beni Culturali (CH) rivestono un ruolo fondamentale nel campo della divulgazione, conoscenza, valorizzazione, conservazione e salvaguardia dell'arte non solo per la comunità degli esperti del settore ma anche per il pubblico interessato. La tecnologia può essere estremamente utile per raggiungere questi scopi grazie all'impiego di tecniche all'avanguardia come quella laser scanner che consentono un'accurata digitalizzazione ad alta risoluzione delle opere d'arte, soprattutto nell'intervallo spettrale del visibile e dell'infrarosso [1, 2]. Si presentano i prototipi di laser scanner RGB-ITR e IR-ITR [3-7], sviluppati presso il C.R. ENEA di Frascati (Roma) nel Laboratorio DIM (Diagnostica e Metrologia).

2. Prototipi RGB-ITR e IR-ITR

L'RGB-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar) è un sistema laser scanner basato sulla tecnica attiva laser-radar range-finding. Opera nel visibile usando tre fasci laser modulati in ampiezza (rosso @ 660nm, verde @ 517nm e blu @ 440nm) focalizzati e sovrapposti per illuminare e scansionare il bersaglio la cui luce retrodiffusa viene catturata dallo strumento. Si tratta di un prototipo innovativo di laboratorio con uno schema ottico monostatico e una configurazione a due moduli (ottico ed elettronico) collegati da fibre ottiche. L'RGB-ITR trova la sua principale applicazione nel campo CH ottenendo una digitalizzazione 3D a colori fedele e ad alta risoluzione delle opere d'arte anche di grandi dimensioni con una risoluzione massima dell'immagine dell'ordine dei Giga pixel e una risoluzione spaziale sub-millimetrica fino a una distanza di 10/15m. Il sistema opera tra 2 e 35 m senza impalcature su un'enorme varietà di materiali sia di giorno che di notte fornendo gli stessi risultati. La frequenza di campionamento massima è di 10.000 punti al secondo. I modelli 3D a colori ottenuti sono completamente navigabili e consentono di raggiungere livelli di zoom molto elevati senza perdere in risoluzione. I modelli non sono influenzati dalle condizioni di illuminazione esterna, sono caratterizzati dall'assenza di ombre e le distorsioni sono ridotte al minimo. La scansione delle opere d'arte avviene da remoto, con una potenza ottica di circa 5mW, senza produrre alcun danno. L'RGB-ITR acquisisce informazioni sulla distanza (struttura) e sul colore (riflettività RGB) per ogni punto campionato, consentendo un'analisi metrica/strutturale e colorimetrica delle opere d'arte indagate. Il sistema IR-ITR (InfraRed ITR) è un prototipo di laboratorio di laser scanner modulato in ampiezza che lavora a una frequenza di modulazione di 300kHz nella regione IR (1550nm) con una potenza ottica di 10mW. Sfrutta lo stesso principio di funzionamento dell'RGB-ITR, ma è in grado di registrare con un'elevata affidabilità solo le informazioni sulla riflettività del bersaglio indagato a causa del basso valore della frequenza di modulazione. L'IR-ITR opera senza impalcature tra 2 e 10 m con una risoluzione spaziale dell'ordine del mm e non è influenzato dalle condizioni di illuminazione ambientale. Sfruttando la maggiore capacità di penetrazione della radiazione infrarossa rispetto a quella visibile, l'IR-ITR permette di rilevare ed evidenziare dettagli nascosti e ripensamenti/correzioni dell'artista non visibili a occhio nudo che potrebbero essere presenti sotto lo strato pittorico superficiale.



Figura 1: Modello 3D a colori ad alta risoluzione della parete Sud e di parte di quella Ovest della Sala delle Muse (Villa Sora, Frascati, Roma) ottenuto con RGB-ITR (progetto ATAP).

3. Conclusioni

Sono stati presentati i due prototipi ENEA di laser scanner RGB-ITR e IR-ITR. Con il primo si ottengono modelli 3D a colori ad alta risoluzione del bene artistico indagato che mostrano dettagli di particolare interesse e alterazioni strutturali/colorimetriche per scopi di fruizione, archiviazione digitale, divulgazione, salvaguardia, diagnostica e monitoraggio. Sfruttando la capacità di penetrazione della radiazione IR al di sotto dello strato pittorico superficiale, sono state ottenute con IR-ITR immagini ad alta risoluzione di riflettografia IR, che mostrano la presenza di dettagli nascosti e ripensamenti/correzioni dell'artista non osservabili nel visibile. È anche possibile effettuare un'indagine multispettrale (visibile + IR) e uno studio differenziale (nel tempo) dello stato di conservazione delle opere d'arte per individuare le aree di possibili interventi di restauro.

4. Bibliografia

1. G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, "State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation," *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, 2009.
2. R. Fantoni, S. Almaviva, L. Caneve, M. Caponero, F. Colao, M. Ferri De Collibus, L. Fiorani, G. Fornetti, M. Francucci, M. Guarneri, V. Lazić, A. Palucci, V. Spizzichino, "Laser scanners for remote diagnostic and virtual fruition of cultural heritage," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 120, pp. 1–21, 2017.
3. M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, and R. Ricci, "Remote Colorimetric and Structural Diagnosis by RGB-ITR Color Laser Scanner Prototype," *Advances in Optical Technologies*, vol. 2012, p. 512902, 2012.
4. S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Francucci, M. Ciaffi, and A. Danielis, "Laser scanners for high-quality 3D and IR imaging in cultural heritage monitoring and documentation," *Journal of Imaging*, vol. 4, no. 11, 2018.
5. S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Romani, L. Giacomini, M. Francucci, M. Ciaffi, M. Ferri De Collibus, A. Puiu, G. Verona-Rinati, F. Colao, R. Fantoni, "Are the blue daemons really blue? Multidisciplinary study for the colours characterization of the mural paintings inside the Blue Daemons Etruscan tomb," *Journal of Cultural Heritage* 47 (2021), 257 – 264.
6. S. Ceccarelli, M. Guarneri, N. Orazi, M. Francucci, M. Ciaffi, F. Mercuri, M. Ferri de Collibus, U. Zammit, F. Petrucci, "Remote and contactless infrared imaging techniques for stratigraphical investigations in painting on canvas", *Applied Physics B* 127, Number 106 (2021), 13 pages, <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07654-1>.
7. S. Ceccarelli, M. Francucci, M. Ferri De Collibus, M. Ciaffi, R. Fantoni, R. Carmagnola, G. Adinolfi, M. Guarneri, "Comparative study of historical and scientific documentation of the paintings in the Querciola Tomb in Tarquinia", *Journal of Cultural Heritage* 61 (2023), 229–237.

ENEA ACTIVITIES FOR CULTURAL HERITAGE IN PROJECT FRAMEWORKS

Laser sensors of DIM Laboratory in the VADUS project

V.Spizzichino, L. Caneve, M. Francucci, M. Guarneri

ENEA - Frascati R. C. - FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: valeria.spizzichino@enea.it

Keywords: Laser Induced Fluorescence (LIF), 3D models, virtual fruition, Non-Destructive Technologies (NDT)

1. Introduction

The project VADUS proposes an innovative methodology for the creation of 3D virtual visits of inaccessible cultural heritage, where also features not visible to the naked eye can be revealed. It is based on the integration of 5G technologies, cloud and satellite services, photogrammetry and multimedia information. The project, coordinated by Next-Ingegneria dei Sistemi and co-financed by the European Space Agency (ESA), involves ENEA, Sapienza University of Rome, TIM, the Archaeological Parks of Colosseum and Ostia Antica, the Pietro Micca Museum of Turin. During the project, some virtual visits have been produced: to the House of Diana in Ostia Antica, to the Aula Isiaca and the Griffin' House in the Colosseum Park and to the "Pastiss" fort in the Pietro Micca Museum in Turin.

In the frame of VADUS, ENEA with the Diagnostics and Metrology Laboratory (DIM) has made available 3 prototype systems: the RGB-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar) [1], IR-ITR (Infra Red Imaging Topological Radar) [2] and the LIF (Laser Induced Fluorescence) imaging called FORLAB [3]. These systems, working in combination, provided compatible and superimposable 3D and 2D representations of the studied artworks. In such way, multi-layer quantitative and qualitative information on structure and defects, colors, surface chemical composition, details hidden by subsequent layers have been structured and are now available to the end users.

2. ENEA results in VADUS project

The sites covered by the VADUS project, having very different diagnostic and fruition problems, made it possible to demonstrate the capabilities of the ENEA prototypes in different contexts and applications. In particular, for the Pietro Micca Museum, the data deriving from the IR-ITR and LIF systems enriched the virtual visit of the Pastiss fort, which cannot be visited, with the results of the analyses on the paintings housed in the art gallery. The obtained data revealed details invisible to the naked eye or disappeared, as a coat of arms and two initials, and characterized the white pigments used on different works (figure 1).



Figure 1: Photographic image of one of the paintings housed in the Pietro Micca Museum, with a detail of the results of the IR-ITR investigations at the bottom which show two initials. The results of the LIF investigations are also superimposed on the picture: the light/bright areas correspond to the areas where the white San Giovanni pigment is present.

For the House of Diana in the Archaeological Park of Ostia Antica, also closed to the public, VADUS has created a virtual visit of various spaces in which the multi-layer 3D representations produced by ENEA provide information on the different construction and restoration phases of the building, thanks to both the chemical and structural information obtained with the combined use of LIF and RGB-ITR systems. For the Aula Isiaca of the Colosseum Park the job and the application have been completely different: the 3D model with native colors and high definition (RGB-ITR) of the decorative apparatus, recovered and preserved in a museum room, has been virtually relocated in the original spaces, modelled by means of photogrammetry by the project partners. This work thus allows visiting the Aula Isiaca in its original form dating back to approximately two thousand years ago.

3. Conclusions

The VADUS project has demonstrated how the technologies of the DIM Laboratory used individually or in combination can respond to various diagnostic and fruition needs, of both professionals (such as restorers, art historians, archaeologists) and generic public. The ability to highlight characteristics not visible to the naked eye, because they are hidden by more superficial layers or by forms of degradation or because they are related to the chemical nature, combined with 3D models with native colors thus provide an analysis and fruition tool highly valuable.

4. References

1. M. Guarneri, L. De Dominicis, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, A. Danielis, A. Mencattini. Imaging topological radar technology as a general purpose instrument for remote colorimetric assessment, structural security, cataloguing, and dissemination, *Studies in Conservation*, (2015), 60(sup1), pp. S134–S142. doi: 10.1179/0039363015Z.000000000218.
2. S. Ceccarelli, M. Guarneri, N. Orazi, M. Francucci, M. Ciaffi, F. Mercuri, M. Ferri de Collibus, U. Zammit, F. Petrucci. Remote and contactless infrared imaging techniques for stratigraphical investigations in painting on canvas, *Applied Physics B* (2021), 127, Number 106, 13 pages. doi: 10.1007/s00340-021-07654-1.
3. V. Spizzichino, L. Caneve, F. Colao. Stand-Off Device for Plastic Debris Recognition in Post-Blast Scenarios. *Challenges* (2016), 7(2), 23. doi: 10.3390/challe7020023.

Smart tools to support resilience and climate change adaptation in historic centres

S. Giovinazzi, M.L. Villani

ENEA, Casaccia R.C., TERIN-SEN-APIC

Corresponding author: sonia.giovinazzi@enea.it

Keywords: urban resilience; cultural heritage; knowledge representation; geographic information system; seismic risk; climate change

1. Introduction

Historic areas, and cultural heritage items therein located, are highly vulnerable to climate change-induced natural hazards as well as to other hazards such as earthquakes and landslides. ENEA, within the European-funded project ARCH *Advancing Resilience of historic areas against Climate-related and other Hazards*, in collaboration with different international and national partners, including INGV, Italian National Institute of Geophysics and Volcanology, and the University of Camerino succeeded in providing user-friendly, useful and readably usable smart tools and services to support the resilience of historic areas.

2. A selection of ARCH Tools

CEN Workshop Agreement CWA 17727:2022 [1] providing a “*City Resilience Development Guide to combine disaster risk management and climate change adaptation - Historic areas*”.

ARCH THIS, Threats and Hazard Information System [2] enabling end-users to access geo-referenced hazard data and information, including both static data (e.g. historic and future projection climate data; seismogenic sources, historic earthquakes) and data acquired in real-time from deployed sensors (e.g. air quality and environmental data from already available sensors; real time data from the Italian Seismic National Network and from the Camerino Urban Seismic Network).

ARCH HARIS, Historic Area Information System [3] enabling end-users to access geo-referenced 2D and 3D data and information about the exposed asset and its vulnerability, e.g. mechanical and chemical characterization of construction materials; vulnerability indexes.

ARCH DSS, Decision Support System (Figure 1) [4] allowing the user-friendly visualization, through dashboards, of impact scenarios for different hazards and for different mitigation intervention strategies. Possible impacts are measured with indicators in line with ISO 37123 [5], quantifying consequences on: i) people (homeless, potentially injures and dead); ii) building physical damage in terms of damage levels; iii) economic losses; iv) consequences on artworks, in terms of loss in heritage value and usability; iii) direct economic losses.



Figure 1: ARCH DSS impact scenarios before and after interventions

3. Conclusions

The on-going digital transition is posing an unprecedented opportunity to enhance the resilience of historic areas and cultural heritage to natural hazards thanks to the availability of low-cost sensors, smart collaborative technologies, interoperable platforms, open-science algorithms and applications. This work presented some tools and services for decision makers and the wider community supporting resilience enhancement of historic areas. These tools democratize access to data, information and know how on the possible impacts that different natural hazards might induce on different exposed elements within historic areas, as well as on the opportunities of implementing resilience strategies to mitigate impacts, to adapt to long term threats and to promptly recover and thrive in the aftermath of crisis events.

4. References

1. CWA 17727:2022. City Resilience Development-Guide to Combine Disaster Risk Management and Climate Change Adaptation-Historic Areas. Available online: <https://store.uni.com/en/uni-cwa-17727-2022> (Accessed 28/08/2023).
2. Costanzo, A.; Falcone, S.; D'Alessandro, A.; Vitale, G.; Giovinazzi, S.; Morici, M.; Dall'Asta, A.; Buongiorno, M.F. A Technological System for Post-Earthquake Damage Scenarios Based on the Monitoring by Means of an Urban Seismic Network. *Sensors* 2021, 21, 7887. <https://doi.org/10.3390/s21237887>
3. Giovinazzi, S.; Marchili, C.; Di Pietro, A.; Giordano, L.; Costanzo, A.; La Porta, L.; Pollino, M.; Rosato, V.; Luckerath, D.; Milde, K. Assessing earthquake impacts and monitoring resilience of historic areas: Methods for GIS tools. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2021,10,461.
4. Villani, M.L.; Giovinazzi, S.; Costanzo, A. Co-Creating GIS-Based Dashboards to Democratize Knowledge on Urban Resilience Strategies: Experience with Camerino Municipality. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2023,12,65. <https://doi.org/10.3390/ijgi12020065>
5. ISO 37123:2019, Sustainable cities and communities - Indicators for resilient cities. Available online: <https://www.iso.org/standard/70428.html> last (Accessed 28/08/2023).

BIONANOinLEGNO: Bio and Nanotechnological innovations in the de-restoration, conservation and sustainable restoration of historical wooden artifacts

F. Tasso¹, G. Migliore¹, C. Isca²

¹ ENEA, Casaccia R.C., SSPT PROTER OEM

² Abapa, Accademia Belle Arti Palermo

Corresponding author: flavia.tasso@enea.it

Keywords: sustainable restoration, biotechnologies, biocleaning, bacteria, waterlogged archaeological and historical artistic woods

1. Abstract

The BIONANOINLEGNO project aims to evaluate the effectiveness of sustainable and innovative biotechnologies and nanomaterials for the de-restoration and restoration of waterlogged archaeological and historical-artistic wooden artifacts. The technologies developed are based on the use of microorganisms and nanomaterials.

2. Introduction

“De-restoration” refers to the removal of materials applied during previous restorations when they are found to damage the integrity of the work. The materials traditionally used in wood restoration have created complex, aged and degraded layers that restorers must remove and replace with new, reversible materials that are safer for the health of the workers and the environment. In the case of wood, bio-technological alternatives are so far unexplored.

3. De-restoration issues

Waterlogged archaeological woods (WAWs): preservation of WAWs is carried out by replacing the water that impregnates the wood with polyethylene glycol (PEG), which maintains the shape and size of the artifact but has undesirable effects, such as color changes, acidification, and alteration of wood properties. Its removal, using alcohol or hot water, is never completely effective. Hence the need to develop an alternative and sustainable method for the “de-restoration” of WAWs.

Historical-artistic woods: the restoration of historical-artistic woods has taken place in very different ways depending on the historical period and with the use of substances that, over time, have proven harmful, resulting in complex composite layers. Some of the most frequently used substances that are difficult to remove are: Paraloid, Polyvinylacetate (PVA) and waxes.

4. BIONANOINLEGNO Project

The BIONANOINLEGNO project (RSI-DTC Lazio) aims to evaluate the effectiveness of sustainable and innovative biotechnologies and nanomaterials for the de-restoration and restoration of waterlogged archaeological and historical-artistic wooden artifacts. Participants are: University of Tuscia (DIBAF), ENEA (PROTER OEM), University “La Sapienza” (Dept. Chemistry), Central Institute for Restoration, Emmebi Diagnostica Artistica and WSENSE. The ENEA OEM laboratory coordinates the “Biotechnology” workpackage that aims to develop a biotechnological solution to wood de-restoration and restoration problems based on “biocleaning,” i.e., the use of microbial cells to remove unwanted deposits of different origins from artworks [1]. Biocleaning provides many advantages: selectivity toward the compound to be removed, low aggressiveness to the artifact, lower hazard to operators, and environmental compatibility. The OEM laboratory has tackled a wide range of case studies that have demonstrated the effectiveness of this technology applied to artifacts of different composition and to a broad range of problems [2]. The bacterial strains used are stored in the ENEA-MIRRI microbial culture collection [3] and are selected from time to time based on the

problem to be addressed.

For the removal of PEG from archaeological woods, a microbial consortium capable of growing in PEG at increasing concentrations has been selected (Figure 1).

For historical-artistic woods, two microbial strains capable of degrading Paraloid, PVA and beeswax were selected from the ENEA-MIRRI collection: LAM21 *Acinetobacter* sp. and ZCONT *Rhodococcus* sp. These strains were initially applied to wood specimens coated with the substances under investigation. Next, the most effective strain (ZCONT) was applied to a dowel on the verso of the wooden panel “Madonna con il Bambino” covered with a thick layer of consolidants (Figure 2). Bacterial packs lasting 18 hours resulted in a softening of the layer of consolidants that facilitated subsequent removal by the restorer, with a significant reduction in the amount of chemical solvents used.

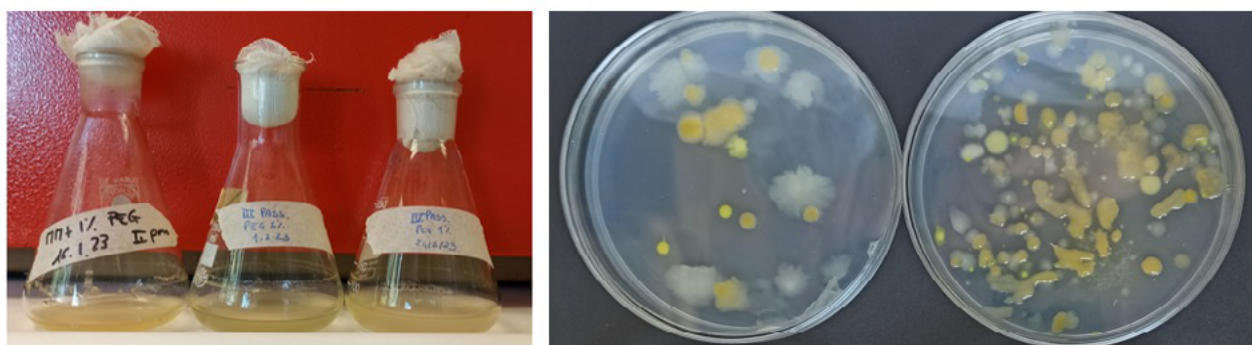


Figure 1. Three successive culture passages in nutrient medium containing PEG1500 1% (w/w); mother plates on which bacterial colonies from PEG enrichment cultures grew.

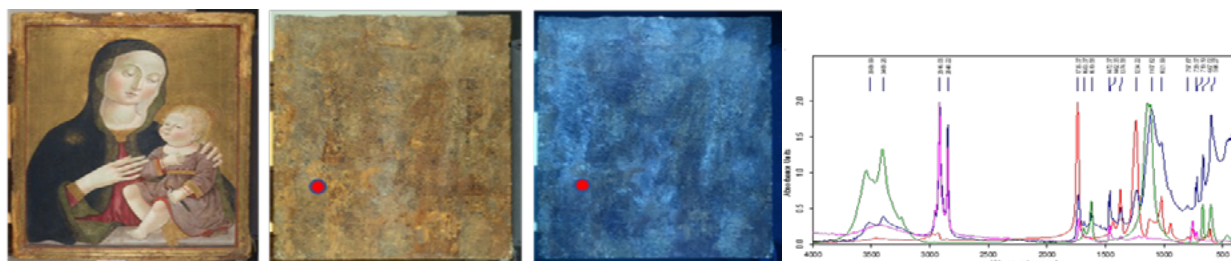


Fig. 2 *Madonna con il Bambino* (Benvenuto di Giovanni) Museo Colle del Duomo, Viterbo. Examination of the verso with visible, grazing and UV light and FTIR-ATR spectrum. Red: PVA; fuchsia: beeswax; green: chalk.

5. Conclusions

BIONANOINLEGNO project challenges to develop restoration products and intervention methodologies to be placed on the market, expanding the restorer's options to use innovative, safe and economical products.

6. Bibliography

1. A.R. Sprocati, C. Alisi, F. Tasso, P. Marconi, G. Migliore. Formule microbiche per l'arte. *Kermes* 100, (2018) pp. 23-26.
2. A.R. Sprocati, C. Alisi, G. Migliore, P. Marconi, F. Tasso. Sustainable restoration through biotechnological processes: a proof of concept. In "Roles of microorganisms in heritage degradation and preservation" (E. Joseph, P. Junier eds.) Springer, (2020), pp. 235-261, ISBN 978-3-030-69411-1.
3. <https://sostenibilita.enea.it/news/microbial-resource-research-infrastructure-italian-node-mirri-it>

Innovative technologies for protecting art objects from seismic and traffic-induced vibrations: the MONALISA project

L. Sorrentino¹, O. AlShawa¹, M.A. Caponero², M.C. Castino³, A. Cataldo⁴, A.M. Cicalese³, V. Fioriti⁴, M. Lamonaca⁵, G. Occhipinti¹, S. Patragoni³, I. Roselli⁴, M.A. Vincenti², P. Clemente⁶

¹*Sapienza University of Rome, Department of Structural and Geotechnical Engineering*

²*ENEA, Frascati R.C., FSN-TECFIS-MNF*

³*Somma International*

⁴*ENEA, Casaccia R.C., SSPT-MET-DISPREV*

⁵*National Etruscan Museum of Villa Giulia*

⁶*ENEA, Casaccia R.C., TERIN-SEN-APIC*

Corresponding author: aurora.vincenti@enea.it

Keywords: Sarcophagus of the Spouses, seismic and traffic vibrations, modal analysis, base isolation, fibre Bragg grating sensors

1. Introduction

Iconic artworks, which are the tourism pull factors for the museums housing them, are often made of fragile materials and have suffered damage during the elapsed centuries. They can also be exposed to relevant hazards such as earthquakes and traffic vibrations. The MONALISA project, funded by Lazio Regional Government and Italian Ministry of Culture, aims to develop a base isolation system for protecting artworks from natural and anthropic vibrations, integrated with a dynamic monitoring network, based on fibre Bragg grating sensors, designed to detect the exceeding of critical amplitude and frequency vibration thresholds.

2. Abstract

The “Sarcophagus of the Spouses”, Etruscan sculpture made of terracotta dating back to the 6th century b.C., showcased in the National Etruscan Museum of Villa Giulia in Rome, was considered as case study (Figure 1). By using the Structure from Motion technique, a 3D mathematical model of the Sarcophagus was obtained as point cloud and polygonal mesh, from which a polystyrene replica of the artwork was made and a finite element model was derived, which was used to perform modal analysis [1]. For the protection and conservation of the artwork, it is firstly necessary an accurate analysis of the characteristics of rail traffic-induced vibrations and the dynamic identification of the statue inside its showcase, by means of the motion magnification method [2]. Furthermore, based on the characterization of the seismic action expected at the museum site and on single-degree-of-freedom modelling, with the writing of the equations of horizontal or vertical motions, and multi-degree-of-freedom modelling, with numerical finite element simulations, a base isolation device was designed. The isolation and monitoring system is currently being tested on shaking table at ENEA Casaccia research center.

3. Conclusions

To protect the Sarcophagus of the Spouses from daily vibrations due to the traffic, and exceptional vibrations due to earthquakes, a base isolation system was designed and manufactured. The proposed technique can be adapted in other contexts associated with objects of small mass and great value, by using the design criteria developed in the framework of this research project.

4. References

1. M.A. Vincenti, M.A. Caponero, M. Lamonaca, G. Occhipinti, O. AlShawa, L. Sorrentino, Proc. of 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2023, Athens, Greece, 12-14 June 2023.
2. V. Fioriti, A. Cataldo, I. Roselli, A. Colucci, P. Clemente, M. Lamonaca and L. Sorrentino, Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 309, pp. 707-716, 2022.



Figure 1: "Sarcophagus of the Spouses", National Etruscan Museum of Villa Giulia (Rome)

Diapason: a high-resolution multispectral 3D scanner for revealing visible and non-visible features in the field of Cultural Heritage

M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Francucci, M. Nuvoli, M. Ciaffi

ENEA, Frascati R.C., FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: massimiliano.guarneri@enea.it

Keywords: 3D multispectral, laser scanner, no-invasive, remote sensing

1. Introduction

The monitoring and creation of digital twins in the field of Cultural Heritage is experiencing a prosperous period, mainly due to the introduction of new technologies and algorithms that allow speeding up the process of data acquisition, manipulation and visualization of the investigated artistic good. The Diagnostic and Metrology laboratory at Research Center ENEA Frascati develops prototype opto-electronic devices for several years within different fields, from monitoring the nuclear field up to industrial and oil&gas sectors [1]: from this experience and the adaptation of such devices to the world of Cultural Heritage, a new laser scanner prototype, called Diapason, has been developed, capable of combining the generation of high-definition digital twins with remote multispectral and colorimetric analysis.

2. The Diapason prototype

As previously introduced, the Laboratory develops 3D laser scanner prototypes based on the amplitude modulation of combined laser sources, able to punctually acquire colorimetric and morphological information of the investigated object [2]. In addition, a few years ago, a prototype, equipped with a near-infrared laser source, able to obtain information under the most visible painted layer, for example in oil on canvas paintings, was developed. Now, Diapason is the union and evolution of these two technologies, because it is equipped with seven wavelengths (355, 440, 535, 580, 660, 800, 1550 nm) allowing to obtain three-dimensional multispectral maps with a maximum resolution up to 60 GPixel.

Such maps have an angular resolution of 0.002 degrees, which corresponds to approximately 0.250 mm at 10 m distance.

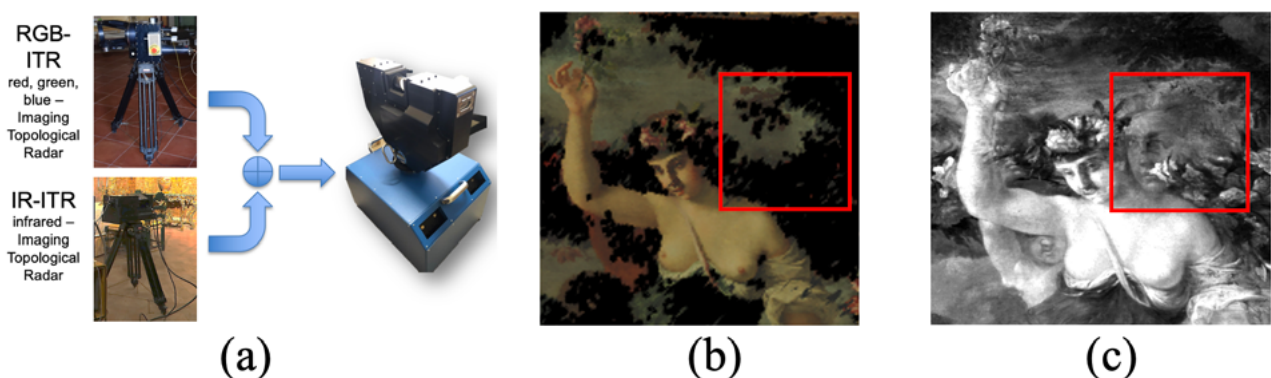


Figure 1: (a) Diapason scanner; detail: (b) 3D colored image (RGB-ITR); (c) infrared layer (IR-ITR) reveals a non-visible detail in (b)

3. Conclusions

The Diapason multispectral laser scanner will allow not only to obtain accurate digital copies of the investigated artistic objects, but also to show (under certain conditions) details not visible to the human eye and easily perform mathematical operations on the different layers [3], such as the use of Artificial Intelligence algorithms, for analysis and classification of pictorial or structural details of the work.

4. Bibliography

1. Guarneri, M. *et al.*, 'Imaging topological radar technology as a general purpose instrument for remote colorimetric assessment, structural security, cataloguing, and dissemination', *Studies in Conservation*, 60 (sup1), pp. S134–S142 (2015). doi: 10.1179/0039363015Z.000000000218.
2. Ceccarelli, S. *et al.*, '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, pp. 257–264 (2021). doi: 10.1016/j.culher.2020.09.002. bibliografia
3. Guarneri, M., Ceccarelli, S., Francucci, M., Ferri de Collibus, M., Ciaffi, M., Gusella, V., Liberotti, R., and La Torre, M.: Multi-Sensor Analysis for Experimental Diagnostic and Monitoring Techniques at San Bevignate Templar Church in Perugia, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-M-2-2023, 693–700, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-693-2023>, 2023

Energy efficiency in the historical buildings. Case studies in the Archeological Park of the Appia Antica

S. Di Turi, N. Calabrese, F. Caffari, G. Centi, F. Giustini, F. Margiotta, D. Palladino, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe

ENEA, C.R. Casaccia, DUEE-SPS-ESU.

Corresponding author: silvia.dituri@enea.it

Keywords: energy efficiency, historic buildings, energy renovation, actual energy consumptions, energy intervention strategies.

1. Introduction

Obtaining high energy performance in historic buildings is a very complex process and the Italian legislation on energy efficiency exempted this kind of buildings according to the Code of Cultural Heritage and Landscape [1]. In fact, they have not to comply the performance standards expected in the case of energy renovations if the interventions can compromise the historical and architectural characteristics. Moreover, the intervention measures must be authorized by the Ministry of Culture through the Superintendencies (art.21 [1]). However, this cannot limit the improvement of the energy performance of historic buildings, whose strategic interest is confirmed by the numerous initiatives and political actions which consider them among the possible applications, such as the “National Recovery and Resilience Plan” [2] and the European “Renovation Wave” [3], as well as international research activities such as the IEA-SHC Task 59 [4], mainly focused on the potential use of solar energy as an effective solution in their energy refurbishment.

2. Summary of the research activity

The ENEA Energy Efficiency Unit Department is currently dealing with the topic, through activities relating to the energy efficiency of complexes of historic buildings in the Electrical System Research [5]. The research considers some building complexes belonging to the Appia Antica Archaeological Park in Rome as pilot cases to achieve the highest possible performance while respecting the historical and artistic value. The activity, divided into two phases (Figure 1), has the primary objective of characterizing the analyzed buildings from a thermo-physical point of view through non-invasive investigation techniques (documentary research, thermography, heat-flux measurements, analysis of the existing plant systems) and estimating of actual consumption through the collection of energy bills and data relating to the used equipment. Subsequently, the energy performance of the buildings

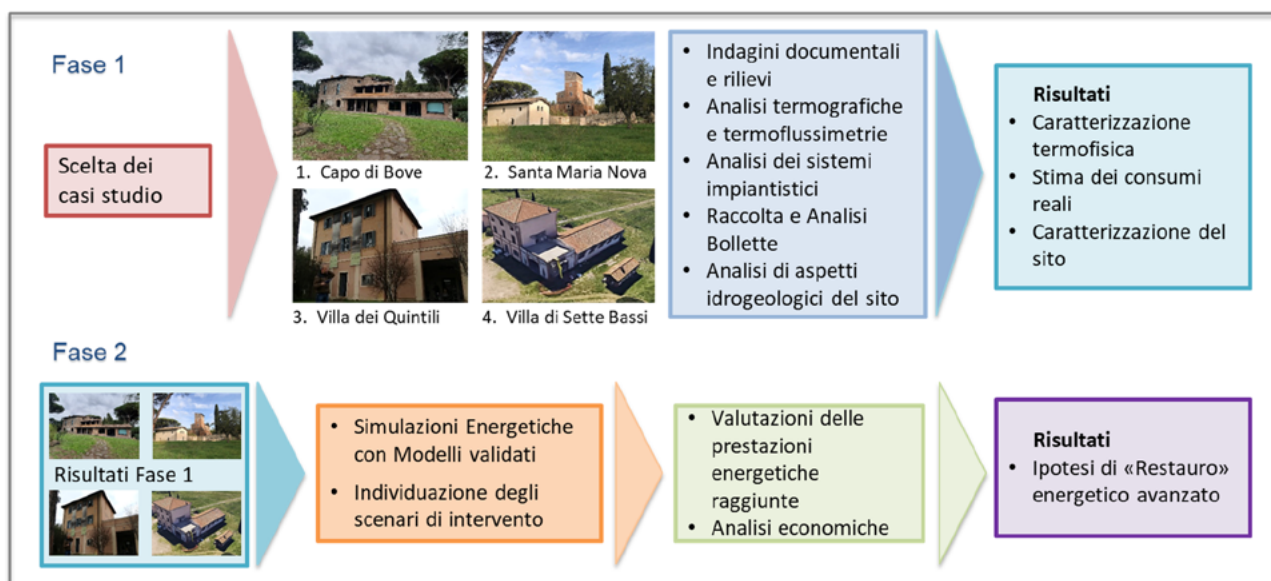


Figure 1: Phases of the research

is evaluated through simulations with an hourly calculation method and different intervention scenarios are analyzed both at building and site level in order to demonstrate the applicability of the interventions strategies for both the envelope and plants systems and the possibility to install energy production systems from renewable energy sources, in compliance with existing constraints.

3. Conclusions

In conclusion, it is possible to state that energy renovation of historic buildings should be considered not an obstacle but an incentive to the protection of the asset. Increasing energy performance in such constrained contexts not only contributes to reach the European objectives of an existing decarbonized building stock but supports the achievement of adequate levels of efficiency and comfort as required by modern standards. The final objective is an integrated vision of all the aspects for both buildings and the entire site to which they belong, in order to promote energy efficiency on a larger scale.

4. Bibliography

1. D. Lgs. 42/2004 – Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, 2004; Available online at: <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2004:42>.
2. The National Recovery and Resilience Plan (NRRP); Available online at: <https://www.mef.gov.it/en/focus/The-National-Recovery-and-Resilience-Plan-NRRP/>
3. European Commission; Renovation wave; Available online at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
4. International Energy Agency (IEA); Solar Heating and Cooling programme (SHC), IEA SHC Task 59: Renovating Historic Buildings Towards Zero Energy, September 2017 – February 2021; Available online at: <https://task59.iea-shc.org/>
5. S. Di Turi, D. Palladino, F. Caffari, G. Centi, F. Margiotta, L. Ronchetti, P. Signoretti, L. Volpe; Efficientamento energetico di complessi di edifici storici e vincolati: caratterizzazione di casi studio reali - Energy efficiency of historic and listed building complexes: characterization of real case studies (LA1.4); Report of Electrical System Research; Program Agreement between Ministry of the Environment and Energy Security and ENEA, Three-Year Implementation Plan 2022-2024, June 2023.

Calliope gamma irradiation facility for Cultural Heritage: the PERGAMO project challenges

A. Cemmi¹, A. Cirigliano², I. Di Sarcina¹, B. D'Orsi¹, G. Ferrara¹, T. Rinaldi², J. Scifo¹, A. Verna¹

¹ENEA, Casaccia R.C., FSN-FISS-SNI.

²Sapienza University of Rome – Charles Darwin Biology and Biotechnology Dept.

Corresponding author: ilaria.disarcina@enea.it

Keywords: ionizing radiation, disinfection, recovery.

1. Introduction

In recent years, the use of ionizing radiation for the recovery and conservation of cultural heritage (CH) has provided alternative and more sustainable solutions than traditional methods. These radiations turn out to be successful for the elimination of insects, fungi and molds from artistic and cultural artifacts. The PERGAMO project (RecuPero dal biodEgRado con metodoloGie fisiche e carAtterizzazione del patriMonio storico e archivisticO), coordinated by ENEA and funded by DTC Lazio, concerns the development of more sustainable physical techniques and processes for the recovery and study of degraded cultural heritage artifacts. For the first time in Italy, ionizing radiation available at ENEA facilities are used for non-invasive treatments and diagnosis of artistic and cultural artifacts [1].

2. Abstract

The efficacy of ionizing radiation in disinfection, consolidation and preservation of CH has been widely studied [2, 3] and, although these technologies are used in many countries, they represent an absolute novelty in the Italian panorama. Their use allows in many cases to avoid the loss of artifacts degraded by biodeteriogens agents and allow to stop the damage, making possible the recovery of objects by restorers. Despite the proven benefits, CH operators demonstrate strong resistance to the use of radiation. This is often due to the incorrect knowledge of physico-chemical changes (side-effects) induced by radiation on the treated materials. Therefore, one of the main PERGAMO purposes is to study and optimize radiation parameters to minimize these effects.

Gamma radiation processing, available at the Calliope facility in ENEA Casaccia, shows many advantages over traditional preservation techniques, since it is non-invasive and allows to treat even multicomposition and large-scale products. The proposed technology is safe for the operator's health, and, thanks to the 60-Co isotope features, the irradiated material does not become radioactive.

Figure 1 shows a case study of PERGAMO project: the treatment of some volumes of the National and University Library in Zagreb (NUL, Croatia). In addition to the characterization of the physico-chemical properties, microbiological analysis of the microbial community was carried out on studied books before and after irradiation exposure to verify the method effectiveness.



Figure 1: volume (1890) attacked by biodeteriogenes (left); growth of the microbial community before (right up) and after (right down) treatment.

3. Conclusions

Ionizing radiations applied for cultural heritage preservation is a very powerful tool for the removal of insects and microbes. At the Calliope facility gamma radiation is used for the treatment, recovery and conservation of cultural heritage [4, 5].

4. Bibliography

1. A. Cemmi, et al., “Le radiazioni ionizzanti in ‘soccorso’ dei beni culturali”, EAI bimestrale dell’ENEA Speciale - **2022**; DOI 10.12910/EAI2022-032.
2. AAVV, Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation, *IAEA Radiation Technology Series 9*, **2017**.
3. A. Cemmi et al., “Gamma radiation-induced effects on paper irradiated at absorbed doses common for cultural heritage preservation”, *Radiation Physics and Chemistry*, 202, 110452, **2022**. doi: 10.1016/j.radphyschem.2022.110452
4. S. Baccaro et al., *ENEA Technical Report*, **2019**, RT/2019/4/ENEA.
5. A. Cemmi et al., *ENEA Technical Report*, **2020**, RT/2020/1/ENEA.

Nanomaterials for Cultural Heritage: cutting-edge solutions for age deterioration of stone monuments

R. D'Amato, G. Terranova

ENEA, Frascati R.C., FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: rosaria.damato@enea.it

Keywords: nanomaterials, 3D printing, protective materials, stones

1. Introduction

In recent years the application of nanomaterials in the field of Cultural Heritage conservation, undergo to a significative increase thanks to their unique multifunctional properties due to the large surface area and great chemical reactivity. Polymeric nanocomposites were used for both conservative and integrative restoration in the framework of two projects funded by the Lazio Region: COLLINE (Conservation of stones using essential oils and nanotechnologies) and 3DH-Solution (3D printing solutions for structural and architectural restoration of Cultural Heritage)

2. Abstract

Ceramic nanoparticles synthesized by laser pyrolysis were applied for both projects. The nanoparticles are: SiO_2 , for hydrophobic properties, TiO_2 , for biocide and photocatalytic properties, and SiC for the 3DH-solution project, for its mechanical properties.

At the research center ENEA Frascati, a laser pyrolysis set-up, called Lucifero (Figure 1), equipped with a CO_2 laser, is used for nanoparticles synthesis, starting from reagents in the gas phase or aerosol phase. A chemical reaction is induced by laser energy, it occurs at high temperatures, and the desired nanoparticles are produced [1]. This synthesis method is particularly advantageous for a series of reasons: first of all it has a high productivity; produces nanomaterials with a high degree of purity and free of contamination, because the reaction zone is confined by an inert gas and far from the walls of the reaction chamber; the properties of the nanoparticles as size, aggregation and chemical composition are easily tuned by varying the main parameters of the process such as gas flows, pressure and laser power.



Figure 1: left: Lucifero set-up, right: SEM photo of SiO_2 nanoparticles

Obtained nanoparticles were dispersed in different polymers depending on the application.

In the framework of COLLINE project, nanocomposites were produced by dispersing nanoparticles in commercial siloxane polymers and products to be applied on medieval peperino monuments for their conservative restoration were obtained. Other commercial protective materials were also applied to counteract biological attack. The results of the various treatments and their effectiveness during months are monitored with different diagnostic methods and by environmental monitoring with ad-

hoc prepared fiber optic sensors.

Nanoparticles have been dispersed in polymers such as PLA, and nanocomposite filaments have been obtained for 3D printing. The scope of 3DH-Solution project is the reproduction of architectural or decorative elements for integrative restoration of missing elements or as copies for fruition or study purposes. Specimens obtained from 3D printing of nanocomposite filaments showed better mechanical and hydrophobic properties compared to commercial PLA [2].

3. Conclusions

SiC, SiO₂ and TiO₂ nanoparticles, synthesized by laser pyrolysis, have been used with excellent results to improve the properties of commercial materials used in the conservative restoration of cultural heritage. The production of nanocomposite filaments and the 3D printing of architectural and decorative elements opens the way to new scenarios also in the field of integrative restoration.

4. Bibliography

1. R. D'Amato, M. Falconieri, S. Gagliardi, E. Popovici, E. Serra, G. Terranova, E. Borsella, "Synthesis of ceramic nanoparticles by laser pyrolysis: from research to applications", *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, **104**, 461-469 (2013), DOI: 10.1016/j.jaap.2013.05.026
2. E. Mansi, G. Terranova, D. Linardi, S. Marfia, E. Monaldo, M. Ricci, M. Imbimbo, A. Pelliccio, A. Brunetin, R. D'Amato, "Development of 3D printed nanomaterials for restoration of exterior artworks", *J. Phys. Conf. Series*, **2579**, 012004 (12 pag) (2023). doi:10.1088/1742-6596/2579/1/012004.

ENEA TECHNOLOGIES FOR CULTURAL HERITAGE: SOLUTIONS FOR STRUCTURAL PROBLEMS

Fiber optic technologies for structural permanent monitoring

C. Mazzotta, M.A. Caponero, A. Polimadei

ENEA, C.R. Frascati, FSN-TECFFIS-MNF

Corresponding author: cristina.mazzotta@enea.it

Keywords: Fiber Optic Sensor FOS, Fiber Bragg Grating FBG

1. Introduction

The ENEA Frascati FOS laboratory can boast a special expertise in embedding fiber optic sensors in composite materials and components. Within public and private funded R&D programs, mature skill and knowledge have been reached in developing sensors based on optic fiber technology, to be used for permanent monitoring of physical and environment parameters, such as strain, temperature, and relative humidity (RH).

2. Abstract

FBG (Fiber Bragg Grating) sensors are well suited for permanent monitoring applications. Outdoor art masterpieces can take specific advantage of two unrivalled features of FBG sensors: weatherability and low invasiveness of both sensors and cabling. Among the numerous interventions carried out by the ENEA FOS laboratory, few examples showing how structural monitoring projects of architectural assets have been carried out, are here reported.

The bronze statue of Bartolomeo Colleoni in Venice

During restoration works, FBG sensors were installed for permanent monitoring of a fracture on the right front leg of the horse, a 15th century masterpiece by Andrea del Verrocchio. Four FBG sensors were installed at the fracture of the leg: i) three sensors devoted to mechanical structural monitoring; ii) one sensor devoted to thermal monitoring/reference. Sensors were prepared on bare fiber and installed with specific resin. After resin cure, the sensors and the fiber are barely visible. The monitoring system is available for long term structural monitoring with respect to thermal (day/night, summer/winter) and mechanical (mainly wind) environmental excitation.



Figure 1. From left to right: the statue, particular almost invisible fiber equipped with sensor; the sensors installed on the leg; example of signals showing a transitory deformation.

The Orvieto cathedral

A monitoring system for opening of cracks has been developed and installed on the large 14th-century Roman Catholic cathedral of Orvieto. It is a multidisciplinary work aimed to assess the conservative state of the cathedral and its seismic vulnerability. The installed sensors perform continuous static monitoring of opening of cracks which are present in the higher part of the central aisle walls, close to the transept. Monitoring shows the correlation between environmental temperature and cracks opening, pointing out both day/night and seasonal crack opening cycles.

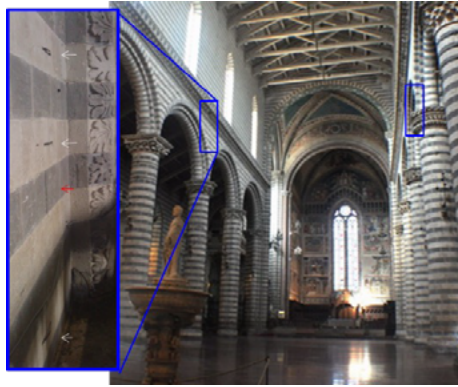


Figure 2. The nave of the cathedral; insets show the installation locations. The expanded view shows the FBG sensors, with evidence of the low visibility of the installation.

The Aurelian walls in Rome

A monitoring system has been developed and installed on the historical complex of the Aurelian Walls of Rome, the actual remains of the line of walls around Rome started by the Roman emperor Aurelian in the third century AD. The activity has taken place as a preliminary investigation prior to planned restoration works aimed to the reopening to visitors of part of communication trenches. The sensors perform continuous static monitoring of the opening of cracks and scheduled dynamic monitoring of masonry strengthening tendons. The monitoring system takes full advantage of the possibility to connect in series FBG sensors, being realized by one thin single optical cable running along the communication trench and interconnecting all the optical sensors.

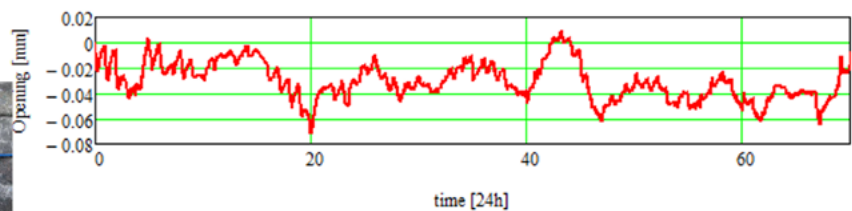


Fig 3. Pictures show a tower of the Aurelian Walls and a sensor installed on one of its cracks. The plot shows time history of one crack opening: the trend is driven by average environment temperature, with superimposed 24/h cycling due to night/day temperature variation.

3. Conclusions

Delicate parts of cultural heritage can be instrumented in order to perform static structural monitoring both for temporary safety control and for addressing consolidation. Moreover, in case of earthquakes or vibrations or simple deterioration, monitoring can point out the danger as well as the response of reinforcements eventually present.

FBG sensors allow the development of structural monitoring systems exhibiting various features, such as: easy installation on wooden, metallic and masonry structures; easy cabling by in-series connection of multiple sensors; high reliability in both static and dynamic operation regime; high endurance to environmental and climatic severe conditions.

The ENEA FOS laboratory applies successfully FBG technology to monitor cultural heritage, by functionalizing fiber optic sensors for the measurement of parameters, such as relative humidity and strain.

The ICT infrastructure of ENEA for Cultural Heritage: from digital twin to structural analysis

M. Mongelli

ENEA, Headquarter, TERIN-ICT-HPC

Corresponding author: marialuisa.mongelli@enea.it

Keywords: digital twin, 3D models, data integration, digital technologies, HPC infrastructure

1. Abstract

The ICT Division of ENEA has been participating in research activities related to Cultural Heritage for several years. In particular, the ICT infrastructure for cultural assets, known as IT@CHA, is accessible, upon authentication, through a dedicated portal. It is fully integrated into the CRESCO6 (Computational Research Center for Complex Systems) computing system, and it is based on the technology of “virtual laboratories”. These are platforms that can be accessed via internet, combining hardware/software resources, computational capabilities for creating digital copies (Digital Twins), visualization tools, virtually unlimited storage, on geographically distributed file systems such as AFS, GPFS, or ownCloud.

Digital Twins are playing an increasingly important role in supporting knowledge, research, monitoring, diagnostics, and the preservation and enhancement of artistic heritage, often in the context of Virtual and Augmented Reality initiatives.

In the ongoing project “D-TECH: Digital-Twin Environment for Cultural Heritage,” the HPC laboratory is engaged in the development of a web-based platform for asset managers, designed to manage digital data and serve as a distributed knowledge system.

2. The IT@CHA Virtual LAB

The IT@CHA (Italian Technologies for advanced applications on Cultural Heritage) Virtual Laboratory, born from the homonymous project, now concluded, funded under the National Program (Research and Competitiveness 2007-2013, <http://www.progettoitacha.it>), is an advanced multimedia platform continuously evolving and dedicated to the Cultural Heritage field.

It provides remote web access and the capability to share hardware and software resources for the definition of numerical models, from 3D reconstructions of point clouds (Digital Twins) to finite element models (FEM) for structural analysis.

This platform works across the entire numerical modeling chain, following the FAIR principles (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) for the integrated use of tools, with the aim of emphasizing interoperability, scalability, and versatility [1].

The adoption of these principles allows the use of recognized and open standards for data and metadata, their transmission and communication, and for the software used.

It also enables the provision of individual data and results to the wider scientific community in a regulated manner, safeguarding attribution rights and promoting dissemination and exchange [2].

As mentioned above, IT@CHA provides hardware and software capabilities to create 3D models, as well as areas to share images, documents, experimental data, and store large volumes of data, with virtually limitless computational power, on geographically distributed file systems such as AFS, GPFS, or ownCloud. It deploys the computing resources of a pool of machines within the infrastructure, specifically dedicated to graphical applications. In particular, it offers the possibility of obtaining photogrammetric reconstructions through the software Agisoft Metashape, their

manipulation through Meshlab software (developed by ISTI-CNR), as well as other open-source software for three-dimensional graphic processing. Remote control of these applications is managed by a software component of the platform that redirects rendering using resources from remote servers. This allows both intensive processing and rendering of the graphical environment.

The following table 1 shows the hardware capabilities of the virtual lab IT@CHA

Table 1. hardware capabilities of the Virtual lab IT@CHA

Hostname	CPU	Memory	GPU
cresco6-nvi1	2x Intel Xeon Platinum 8160 2.10GHz 48 cores	192 GB	Nvidia Tesla V100 32 GB
cresco6-nvi2	2x Intel Xeon Platinum 8160 2.10GHz 48 cores	192 GB	Nvidia Tesla V100 32 GB
cresco4-nvi1	2x Intel Xeon E5-2680 2.80 GHz 20 cores	64 GB	2x Nvidia K40m 12GB

Over the years, new implementations and functionalities have been developed, such as a modern NoSQL database dedicated to storing metadata of digital objects, making them readily available for effortlessly integrating with advanced visualization services such as 3D HOP or the IIPImage server for high-resolution gigapixel images [3].

These new capabilities are hosted on a dedicated virtual machine (heritagescience.portici.enea.it) managed within a VMWare cluster to ensure redundancy and backup.

3. Conclusions

The ability to carry out all numerical modeling processes within a single remotely manageable environment, using the IT@CHA virtual lab with adequate computing capacity, represents an undeniable advantage. Furthermore, there are plans for implementation with other open-source software for dimensional and geometric analysis, comparison, and multi-resolution point cloud visualization, as well as automatic pattern recognition.

4. Bibliography

1. Wilkinson, M., et al., 2016, The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Sci Data* 3, 160018, <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>.
2. Canciani, M. et al., 2020, Modelli 3D e dati GIS: una loro integrazione per lo studio e la valorizzazione dei beni culturali, in *Archeomatica* N°2, giugno 2020, pp.18-23.
3. Puccini, M., et al., 2021, Integrated Survey and 3D Processing on Enea CRESCO Platform: the Case Study of San Nicola in Carcere in Rome, *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2204, 2021 International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (MetroArchaeo 2021) 20-22 October 2021, Milan, Italy doi 10.1088/1742-6596/2204/1/012101.

Seismic Protection of Architectural Heritage

B. Carpani

ENEA, Brasimone R.C., SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: bruno.carpani@enea.it

Keywords: architectural heritage, monuments, anti-seismic techniques, seismic vulnerability, archaeoseismology

1. Introduction

Some of the most significant anti-seismic interventions on architectural heritage carried out with the involvement of the ENEA seismic engineering laboratory (currently SSPT-MET-DISPREV) are here briefly described. The activities cover a wide period, from the mid-1990s to the last decade. There are innovative interventions (sometimes pioneering) alongside others of more conventional type, but all marked by an open and multidisciplinary approach.

2. Abstract

After the earthquakes that struck the Reggio-Emilia province (1996) and the Marche-Umbria region (1997), in the framework of the EU project ISTECH, ENEA took part in the seismic retrofitting of the Trignano belltower (RE) and the tympanum of the S. Francesco Basilica in Assisi (figure 1) where, for the first time in the world (1999), shape memory alloys devices (SMAD) with super-elastic behavior were employed [1].

The use of buckling restrained axial dampers (BRAD) finally allowed the long-time awaited reconstruction of the Clock Tower of Gemona (2015) (figure 2), collapsed after the 1976 Friuli earthquake [2].



Figure 1: S. Francesco Basilica and Trignano bell tower: details of SMAD devices

Figure 2: Gemona Clock Tower: details of structure and BRAD device

Figure 3: Tower of Montorio: façade view and intervention details

ENEA supervised the anti-seismic restoration of the architectural complex of the Tower of Montorio (XIII-XVIII c., figure 3), damaged after the 2003 Apennine Bolognese earthquake. In this case, the philological approach used, calling into play historical and archaeoseismological tools, has allowed the identification of the monument seismic behavior as well as the development of repair techniques consistent with the original building lexicon [3].

3. Conclusions

The above-described interventions on important monuments show that ENEA has played a noteworthy role for the seismic protection of architectural heritage, they also show that research on innovative technologies can be effectively integrated with historical and archaeoseismological analysis.

4. Bibliography

1. M. Indirli, B. Spadoni, B. Carpani, R. Cami, P. Clemente, A. Martelli, M. G. Castellano, “Research, Development and Application of Advanced Antiseismic Techniques for Cultural Heritage in Italy”, “Proc. 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures”, Yerevan, Armenia, October 6-10, 2003.
2. R. Antonucci, B. Carpani, A. Poggianti, “Restauro e ricomposizione della Torre dell’Orologio a Gemona”, “Proc. Seminar: New ideas for the seismic retrofitting of historical buildings”, ENEA, 11 maggio 2010, available at: <http://www.enea.it/eventi/eventi2010/AdeguamentoSismico110510/Resoconto110510.html>
3. Carpani B., Antonucci R., “The Seismic Restoration of the Medieval Architectural Complex of the Montorio Tower (Northern Italy)”, Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, PROHITEC 2014, pp. 127-132, ISBN 978-975-518-361-9.

Applications of motion magnification to the cultural heritage

E. Fioriti, I. Roselli, A. Cataldo, C. Ormando, A. Colucci

ENEA - Casaccia R. C. – SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: vincenzo.fioriti@enea.it

Keywords: digital videos, motion magnification, cultural heritage

1. Abstract

Recently, some improvements in the video elaboration techniques, namely the motion magnification, have paved the way to new analysis methods for the environmental vibrations. The DISPREV laboratory has specialized these methods to the protection of the cultural heritage.

2. Introduction

In the last years, the ENEA DISPREV lab has introduced a novel methodology, based on the motion magnification (MM), into the Italian cultural heritage protection and monitoring field. It consists of a digital video signal processing technique [1, 2] able to amplify enormously the tiny movements recorded in conventional videos, while preserving the general topology. Although this idea is not new, it has been provided recently an efficient

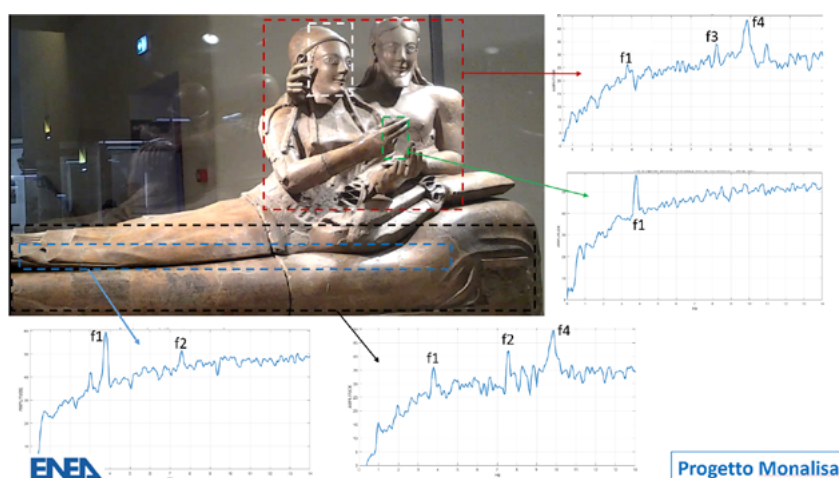


Figure 1: A magnified frame and its frequency domain analysis.

algorithm that makes possible a viable and low-cost magnification. As ancient artefacts might be extremely sensitive to even minimally invasive instrumentation, most common monitoring sensors should be replaced by non-contact tools, such as video-based techniques like the MM. Actually, the MM was used to study the Sarcophagus of the spouses, the temple of Minerva Medica, the Tower of Pisa, the Bridge of towers of Spoleto, the Campana tomb [3, 4].

3. Conclusions

Even if many technical issues remain to be fixed, MM proved to be a very useful and low-cost tool. Sometimes, when the artefact is extremely sensitive, contactless methods are mandatory, and therefore in these situations the motion magnification is preferable.

4. References

1. Wu, H.-Y.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Guttag, J.V.; Durand, F.; Freeman, W.T. Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world. *ACM Trans. On Graphics* 2012, 31(4), 65.
2. Wadhwa, N.; Wu, H.Y.; Davis, A.; Rubinstein, M.; Shih, E.; Mysore, G.J.; Chen, J.G.; Buyukozturk, O.; Guttag, J.V.; Freeman, W.T.; Durand, F. Eulerian Video Magnification and Analysis. *Communications of the ACM* 2017, 60, pp 87- 95.
3. Fioriti, V.; Roselli, R.; De Canio, G. Frequency Domain Analysis of the Minerva Medica Temple by means of the Motion Magnification Methodology. In *Proceedings of Metroarchaeo 2018*, Cassino, Italy, 22-24 October 2018.
4. Fioriti, V.; Roselli I.; Tati A.; Romano R.; De Canio, G. Motion Magnification analysis for structural monitoring of ancient constructions. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 2018, 129, pp. 375-380.

Study of vibrations and shaking table experimentation for the protection of cultural heritage

I. Roselli, V. Fioriti, A. Cataldo, M. Baldini, A. Colucci, A. Picca

ENEA, Casaccia R.C., SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: ivan.roselli@enea.it

Keywords: vibrations, shaking table, seismic protection

1. Introduction

Art objects and ancient structures can be particularly vulnerable to vibrations, both of natural (i.e. earthquakes) and of anthropic (for example work on construction sites and transport traffic in highly urbanized contexts) origin. Shaking table tests are the most reliable laboratory experimentation technique capable of realistically reproducing vibrational excitation on large objects, even structures or parts of structures. The seismic hall at the ENEA Casaccia Research Center is equipped with two 6-DOF vibrating tables, among the largest in Europe, still cutting-edge today in terms of size and performance. The largest shaking table, measuring 4 x 4 m² and capable of maximum displacements of 12.5 cm in all directions, also allows to test prototypes of up to two-storey full-scale structures (height of over 5 m). These experimental facilities are constantly enriched and innovated with the acquisition and development of new measurement instruments and new vibration analysis techniques, which make the experimental capabilities of this laboratory an excellence that is continually renewed at the highest levels. In particular, in 2007 it was the first seismic engineering laboratory in the world to be equipped with a passive 3D motion capture system dedicated to shaking table tests (3DVision system). This type of system was subsequently adopted in other important laboratories of this kind in Italy and abroad. In short, this system is capable of tracking the 3D displacements of hundreds of measurement points of an object subjected to seismic tests with an accuracy of less than a tenth of a mm and with a sampling frequency of up to 2000 Hz. Thanks to the updating, extension and continuous renewal of its components, the 3DVision system still remains the most advanced of its kind in Italy.

Furthermore, since 2017 a new advanced processing technique derived from the motion magnification (MM) method has also been applied for the study of vibrations. The MM is able to provide indications on the response of an object subjected to vibration from the analysis of simple videos, which represents the last frontier of the study of vibrations using digital vision tools. Evidence of ENEA's continuous commitment to updating and renovating the seismic hall is the adaptation of the laboratory equipment and equipment for its inclusion in the FIXLAB platform of the Italian node (E-RIHS.it) of the European E-RIHS network (European Research Infrastructure for Heritage Science). This constitutes a network of laboratories capable of offering access to cutting-edge scientific instruments and knowledge in the Cultural Heritage sector.

The seismic hall is also equipped with two large electro-dynamic shakers (the largest with a 1.50 x 1.50 m² sliding table) to reproduce one-directional vibrations up to 2000 Hz.

The seismic hall of the ENEA Casaccia Research Center is also equipped with a reaction wall equipped with two actuators that can be positioned at different heights up to 3.4 m. This is capable of performing dynamic, cyclic or pseudo-static horizontal thrust tests.

The large dimensions of the seismic hall permit to set up a real construction site area of up to approximately 10 x 13 m² for the safe construction of prototype structures to be subjected to vibration tests.

In addition to the seismic hall, there is also a battery of environmental chambers (climatic and salt spray chambers of various sizes and performances) for accelerated aging tests on even large specimens for post-aging vibration.

2. Main research activities

An important research line is the experimental validation of isolation systems for statues and museum objects, such as the anti-seismic bases for the Bronzes of Riace and for the Sarcophagus of the Spouses at the National Etruscan Museum of Villa Giulia in Rome (MONALISA project).

A very successful recent experience was the RestArt. The project partners developed an innovative method for the reassembly of large stone fragments using a high-precision mechatronic system. In order to verify the effectiveness of the reassembly method, a series of tests on a shaking table (figure 1a) was carried out on marble and travertine pillars subjected to vibrations generated by extreme earthquakes or by high-speed transport on very rough roads.

Moreover, great effort is dedicated to the study of new anti-seismic reinforcement techniques for historic walls. Such topic is very relevant in Italy, because most part of the Italian built heritage is located in medium and high seismicity areas and is represented by this construction typology, often characterized by poor quality and high seismic vulnerability. Several reinforcement options were formulated and tested on wall panels subjected to cyclic reaction wall tests. The aforementioned reinforcement interventions were then also tested on a historic brick house typical of the epicentral area of the central Italy seismic sequence, subjected to tests on a shaking table with and without reinforcement (figure 1b).

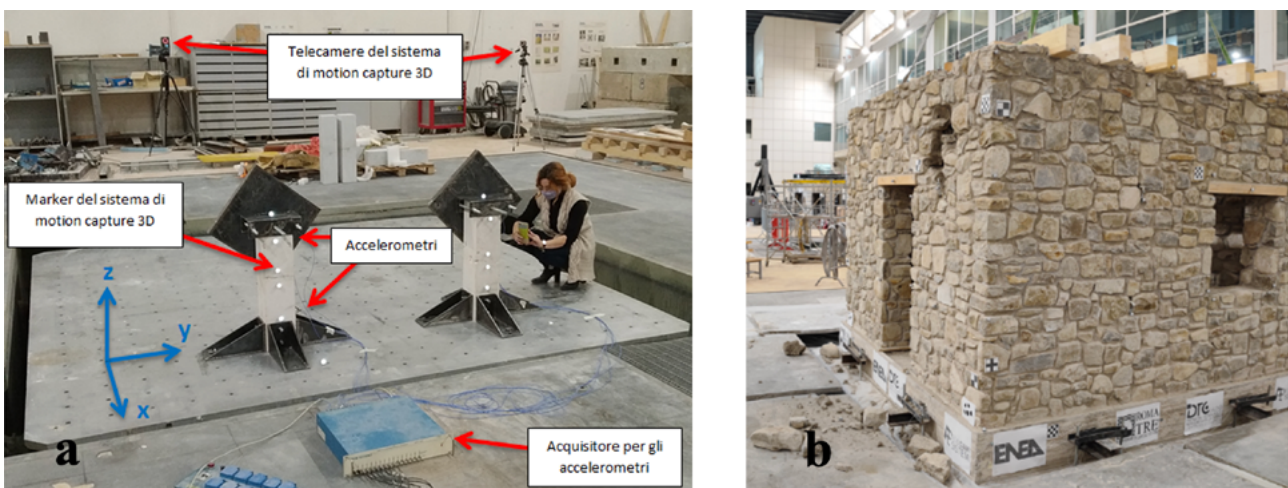


Figure 1: Tests on a shaking table: a) comparison of the seismic vibration resistance of a marble specimen reassembled with the traditional technique (left) and one reassembled with the RestArt system (right); b) historic brick house typical of the epicentral area of the seismic sequence of central Italy 2016-201

Structural Analysis and Modelling for the Conservation of Cultural Heritage

F. Saitta

ENEA, Casaccia R.C., SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: fernando.saitta@enea.it

Keywords: Finite Elements, Structural Analysis, Masonry Structures, Cultural Heritage

1. Introduction

Finite Element modelling and analysis, or kinematic analysis by definition of collapse mechanisms, even with some limitations, have a fundamental role in safeguarding Cultural Heritage structures because they give a mechanics-based representation of the structural behaviour. This paper shows some models developed by the author in the framework of studies and activities in ENEA.

2. Case studies

Structural models using solid or beam elements were developed in the framework of studies on historic masonry towers. Figure 1 shows on the left the model developed for the vulnerability study of the *Minaret of Jam* [1]), with the related modal shapes, whereas on the right, the model of the *Stylite tower* at Umm Ar-Rasas is shown [2]), with the strength domains of one section derived assuming nonlinear material behavior.

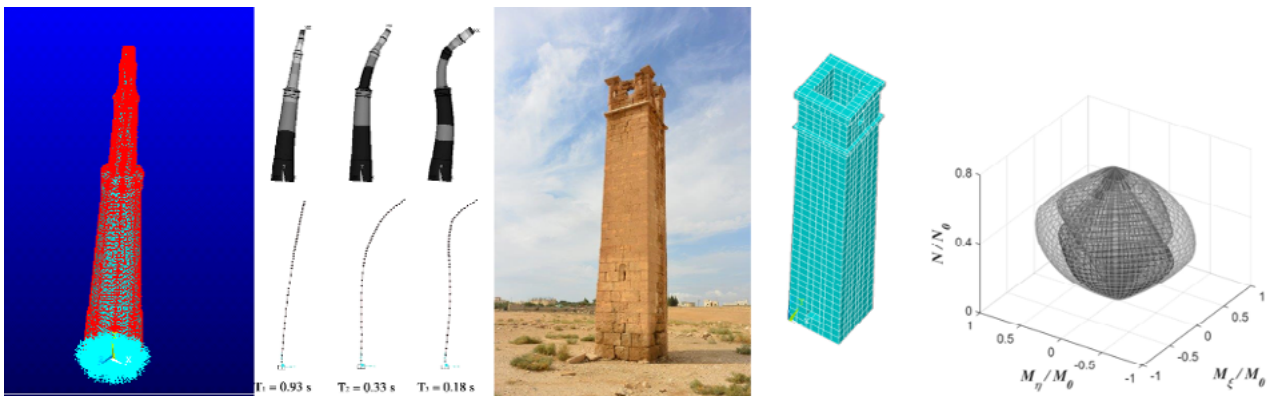


Figure 1: Model of the Jam Minaret and of the Stylite tower at Um Ar-Rasas

In the context of historic buildings, among the treated cases, it is worth noting the *Palazzo Marchesale* of San Giuliano di Puglia [3]), based on solid finite elements, and *Palazzo Torlonia* in Avezzano (Figure 2), the latter based on equivalent frames, for the evaluation of seismic vulnerability.

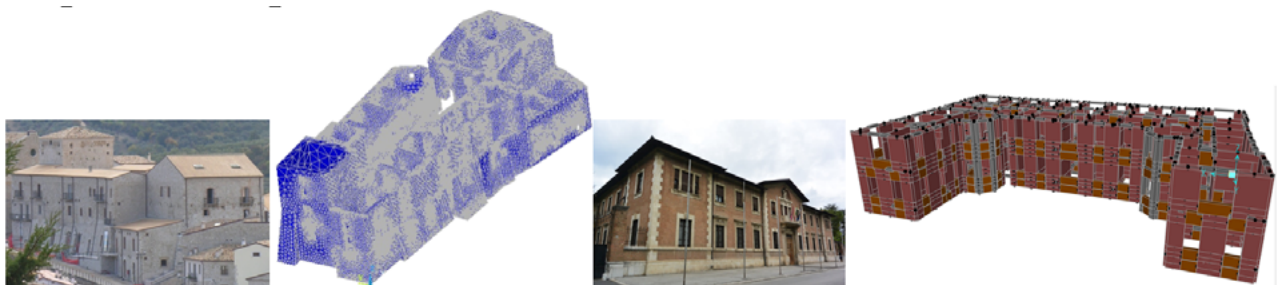


Figure 2: Models of Palazzo Marchesale and Palazzo Torlonia.

With reference to traffic-induced vibration on monuments, it is interesting to highlight the modelling of the *Tempio di Minerva Medica* in Rome (Figure 3) [4]).

Finally, for the conservation of historical masonry arch bridges, they are of interest the studies for

evaluating collapse load (Figure 4) based on limit analysis [5]), with the development of the related computer codes.

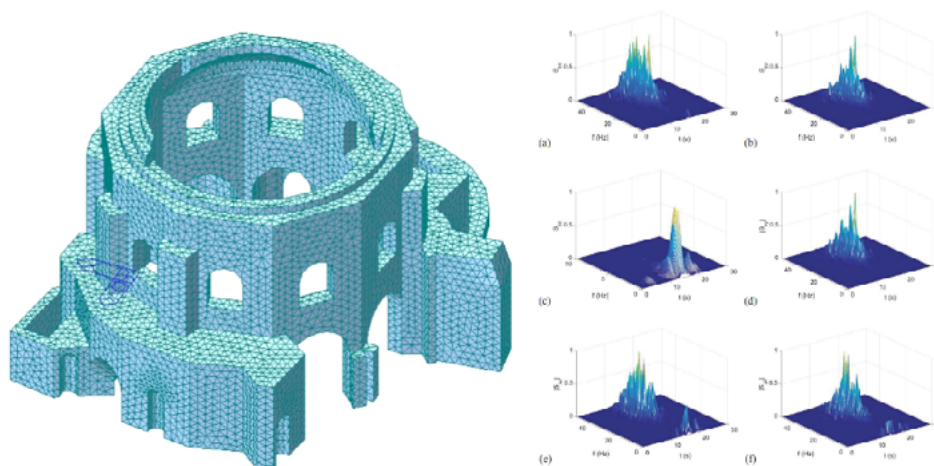


Figure 3: Model of Tempio di Minerva Medica and traffic power spectral densities.

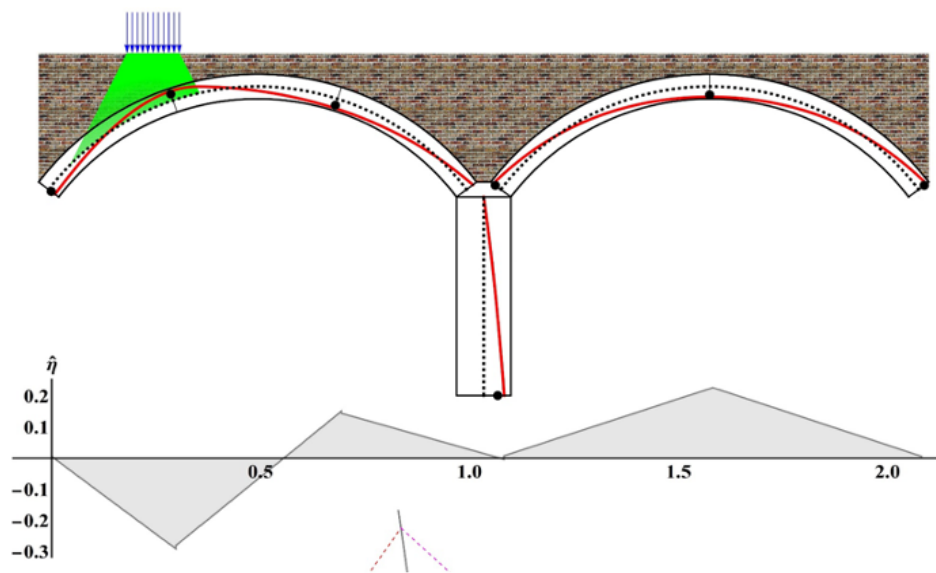


Figure 4: Limit analysis of masonry arch bridges.

3. Conclusions

The paper reports a synthetic view of some of the models developed for dynamic analyses, and structural/seismic vulnerability studies, using commercial finite element software or self-produced computer codes.

4. References

1. Clemente, P., Saitta, F., Buffarini, G., Platania, L. (2015). Stability and seismic analyses of leaning towers: The case of the minaret in Jam (2015) *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24 (1)
2. Clemente, P., Delmonaco, G., Puzzilli, L., Saitta, F. (2019) "STABILITY AND SEISMIC VULNERABILITY OF THE STYLITE TOWER AT UMM AR-RASAS, *Annals of Geophysics*, 62 (3),
3. F. Saitta, G. Bongiovanni, G. Buffarini, P. Clemente, D. Rinaldis, G. Rossi, *Nonlinear Analysis of an Historical Building under Earthquake loading*, 10NCEE, July 2014
4. Saitta, F., Forliti, S., Colucci, A., Tati, A., Roselli, I. (2020). Dynamic modelling of tram-induced vibration on the temple of Minerva medica in Rome. *Proceedings of the XI International Conference on Structural Dynamics EUROdyn2020*, 23-26 November, Athens, Greece
5. Saitta F., Clemente P., Buffarini G., Bongiovanni G. (2020). The Mechanism Method in the Analysis of Two-Span Masonry Arch Bridges. In: Arède A., Costa C. (eds) *Proceedings of ARCH 2019* (ARCH 2019, Porto 2-4 Oct 2019). Structural Integrity, Vol 11. Springer

Experimental vibration analysis in the preservation of cultural heritage

P. Clemente

ENEA, Casaccia R.C., TERIN-SEN-APIC

Corresponding author: paolo.clemente@enea.it

Keywords: seismic risk, structural preservation of cultural heritage, experimental vibration analysis

History teaches that most of the ancient monuments were definitively destroyed by natural events, and earthquakes were the most common cause of collapse. On the other hand natural ageing of the materials, associated to the erosion due to wind and rain, as well as to pollutants, and to the effects of the thermal cycles, can determine a continuous deterioration of the exposed surfaces with a significant reduction of the material strength and therefore of the structural capacity. Furthermore, traffic-induced vibrations could increase and accelerate the deterioration processes, so facilitating a significant increase of the vulnerability to static and dynamic actions or even a collapse under seismic actions.

The analysis of the effects of the mentioned stresses to cultural heritage sites and structures is quite hard also because of the scarce knowledge of the actual geometry and of the materials, especially with reference to the foundations and soil characteristics, but often also to the elevation structure. The visible elements and materials not always correspond to the effective inside structural ones. So detailed analyses are needed and should be done preferably using non-destructive testing.

Furthermore, in most cases monumental sites and structures were built without accounting for the horizontal actions, so they are very vulnerable to earthquakes and to traffic-induced vibrations. These represent continuous actions that affect buildings but are also a suitable and free source of excitation for experimental dynamic analysis of structures. Therefore, traffic-induced vibrations are widely used to investigate the structural health status also for historic buildings.

It is worth reminding that the dynamic behaviour of historic structures is quite complex due several reasons, such as the complexity of the geometrical characteristics, the nonlinear behaviour of the material and the non-effectiveness of the connection between vertical and horizontal elements. As a result identification of the dynamic characteristics and seismic analysis are quite hard. Furthermore, the numerical analysis by means of finite element models, which is usually very helpful to analyze the expected behaviour and also to interpret the experimental results, contains large uncertainties. These uncertainties are related to the effective size of the various structural elements and the characteristics of the materials, which often exhibit inelastic behaviour. Therefore, for such kind of structures the experimental analysis is often the only way to improve our understanding about their dynamic behaviour. In some cases, the soil-structure interaction plays a fundamental role in the stability and the dynamic behavior.

The first interesting applications referred to monuments in Rome (the Flaminio Obelisk, the Aurelian and Trajan's Columns, the Minerva Medica Templum, the Colosseum, ...). Structures were instrumented and the effects of ambient and traffic-induced vibrations were recorded and analyzed in time and frequency domains, extracting the dynamic properties of the structures. Some of the monuments were tested again after several years, giving updated information about their dynamic behavior and structural health conditions. Among the other main applications, it is worth reminding:

- Villa Farnesina in Rome, protected from the effects of the heavy vehicular traffic, by an anti-vibration paving on the near Lungotevere.
- The medieval Bell Tower of S. Giorgio Church in Trignano, Italy, seriously damaged by the Reggio Emilia Earthquake on October 15th, 1996, monitored for two months by an accelerometer network.
- The complex building of the Centre for Anthropological Documentation and Research of Nerina Valley in Cerreto di Spoleto, damaged by the 1997 Umbria-Marche seismic sequence.

- Palazzo Marchesale in San Giuliano di Puglia, where a fixed accelerometric network was installed after the retrofit intervention.
- The Circus Maximus in Rome, where the effects of a pop music concert were recorded and analyzed.

1. Bibliografia

1. Puzzilli L., Bongiovanni G., Clemente P., Di Fiore V., Verrubbi V., Effects of Anthropic and Ambient Vibrations on Archaeological Sites: The Case of the Circus Maximus in Rome. *Geosciences* 2021, Vol. 11, No. 11, 463, MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, Switzerland, <https://doi.org/10.3390/geosciences11110463>.
2. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Saitta F., Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column. *Int. J. of Architectural Heritage*, Taylor & Francis, Vol. 15, No. 1, 64-78, <https://doi.org/10.1080/15583058.2019.1706785>.
3. Clemente P., Delmonaco G., Puzzilli L., Saitta F., Stability and seismic vulnerability of the Stylite Tower at Umm ar-Rasas. *Annals of Geophysics*, Vol. 62, No. 3, SE340, INGV, Rome, <https://doi.org/10.4401/ag-8004>.
4. Alberti L., Azzara R., Clemente P., Lessons from the past: the evolution of seismic protection techniques in the history of building. Preface to Special Issue of *Annals of Geophysics*, Vol. 62, No. 3, SE345, INGV, Rome, <https://doi.org/10.4401/ag-8373>.
5. Clemente P., Extending the life span of cultural heritage structures. Foreword to *Structural Health Monitoring of Cultural Heritage Structures*, Special Issue of *J. of Civil Structural Health Monitoring*, Springer, Vol. 8, No. 2, 171-179, <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0278-3>.
6. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F., Experimental vibration analyses of a historic tower structure. *J. of Civil Structural Health Monitoring*, Springer, Vol. 7, No. 5, 601-613, <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0245-4>.
7. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F., Dynamic Characteristics of the Amphitheatrum Flavium northern wall from traffic-induced vibrations. *Annals of Geophysics*, Vol. 60, No. 4, S0439, INGV, Rome, <https://doi.org/10.4401/ag-7178>.
8. Clemente P., Hailemichael S., Milana G., Orlando L., Monitoring and Seismic Characterization of Archaeological Sites and Structures. Preface. Foreword to Special Issue of *Annals of Geophysics*, Vol. 60, No. 4, S0447; <https://doi.org/10.4401/ag-7480>.
9. De Stefano A., Matta E., Clemente P., Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences. *J. of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 6, No. 1, 83-106, Springer, <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0154-y>.
10. Clemente P., Saitta F., Buffarini G., Platania L., Stability and seismic analyses of leaning towers: the case of the minaret in Jam. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, 40-58, Wiley, <https://doi.org/10.1002/tal.1153>.
11. Clemente P., Rinaldis D., Buffarini G., Experimental seismic analysis of a historical building. *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 18, No. 8, 777-784, SAGE Publications, ISSN 1045-389X.07.080777-8, <https://doi.org/10.1177/1045389X07074601>.
12. Indirli M., Castellano M.G., Clemente P., Martelli A., Demo Application of Shape Memory Alloy Devices: The Rehabilitation of S. Giorgio Church in Trignano. *Proc. SPIE 4330, Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, Vol. 4330, No. 1, 262-272, <https://doi.org/10.1117/12.434126>.

Activities on non-destructive testing (NDT) and development and creation of software dedicated to NDT for the conservation of cultural heritage

A. Tati

ENEA, Casaccia R.C., SSPT-PROMA-MATPRO

Corresponding author: angelo.tati@enea.it

Keywords: Non-Destructive Testing, Sonic Test, Ultrasonic Test, Tomography and X-ray radiography, Thermography, Visual Test

1. Introduction

ENEA CR Casaccia is equipped with a NDT laboratory belonging to the SSPT-PROMAS-MATPRO unit which operates in diagnostics in the industrial, civil and Monumental Heritage fields. The Laboratory can carry out: characterization and defect analysis of components and new materials; characterization of probes and instrumentation for NDT; development of software dedicated to automatic systems for non-destructive testing; training. Potential users of this service are: aeronautical, naval, nuclear fission, nuclear fusion, automotive, rail transport, masonry and concrete constructions, Architectural and Monumental Heritage sectors.

2. Abstract

It carries out non-destructive analyzes in industrial sectors where aspects of safety, for humans and the environment, and of guaranteeing product quality are involved. It applies both innovative and traditional methods for the development of production processes, for product quality controls and for the in-service inspection of plant components, it also carries out diagnostic interventions on monuments and historic buildings and collaborates with museums and superintendencies. In the field of Cultural Heritage, the CND laboratory has performed various diagnostic interventions over the years on works of historical/artistic value, among which the most significant:

Lateran Obelisk in Rome: Sonic and ultrasonic tests on the connection joints of the granite ashlar and carried out during the sixteenth-century restoration, development of Sonic Tomography software for the analysis of the joints and the subsequent FEM calculation for the study of the seismic vulnerability of the monument, 3D reconstruction of the Obelisk using laser scanner.

Apollo of Veii - Valle Giulia Museum - Rome: Endoscopic inspection and thermographic analysis

Riace Bronzes - Museum of Magna Graecia - Reggio Calabria: Ultrasonic examination to determine the thicknesses, subsequent FEM analysis and design of the anti-seismic device.

Orvieto Cathedral: Crack pattern of the columns and the central nave, Seismic vulnerability of the structure via sonic tomography, laser scanner and thermography

Bronze of St. Peter - Vatican Basilica: endoscopic inspection

Santa Croce, Baroncelli Chapel, Florence: Thermographic analysis for the identification of fresco detachments

Dome of S. Maria della Pace - Massa Martana PG: Architectural survey via laser scanning and thermographic analysis for the revelation and mapping of the fresco detachments

Heliodorus Room - Raphael - Vatican Museums: thermographic analysis for the revelation and mapping of the fresco detachments

Temple of Minerva Medica Rome: Sonic Tests, Laser Scanning, Thermography and Microclimate Monitoring

Base of the statue of Boniface VIII Capitoline Museums: Sonic Tomography

Base of the statue of Filippo Corridoni Parma: Sonic tests

Palazzo della Farnesina headquarters of the Ministry of Foreign Affairs Rome: control of false ceilings and external cladding using thermography and other techniques

Bust of Scipione Borghese, Hermas of Bacchus, Statue of Hercules - Galleria Borghese Rome: Ferri research, endoscopy and ultrasonic tests

Venetian helmets recovered in Torre Santa Sabina Brindisi ICR Rome: X-ray tomography

Palazzo Todesco, Palazzo Piazzoni- Vittorio Veneto Treviso: Laser scanner, thermography, sonic tests and ultrasound

3. Conclusions

The activities listed are some of the many applications of non-destructive testing in the field of cultural heritage carried out by the ENEA Casaccia non-destructive testing laboratory. These techniques developed for the Nuclear sector have been transferred over the years to the field of Cultural Heritage. In addition to the analysis of the materials of artistic works for the search for small defects, these techniques are also used for the structural analysis of large artefacts such as churches and palaces. In 2020, the new Gilardoni Tomograph was added to the existing instrumentation which offers 2 x-ray sources with a high power of 450 KV and a 150 KV microfocus which allow the analysis of works of different sizes and with radiographic image resolutions ranging from a tenth of mm to micron. The acquisition was possible through the MAIA project of the Lazio region and ENEA for the renovation of the technological hall.

	
<p><i>Figure 1: Obelisk of San Giovanni in Laterano in Rome</i></p>	<p><i>Figure 2: Instrumented hammer for sonic tests</i></p>
	
<p><i>Figure 3: Sonic Tomography</i></p>	<p><i>Figure 4: Sonic Tomography of the interior of the Lateran obelisk</i></p>

4. Bibliography

1. Ivan Roselli, A. Tati, Vincenzo Fioriti, Marina Magnani Cianetti, et al., Integrated approach to structural diagnosis by non-destructive techniques: the case of the Temple of Minerva Medica October 2018 DOI: 10.21014/acta_imeko.v7i3.558.
2. Gerardo De Canio, Marialuisa Mongelli, A. Tati, Flavio Borfecchia, Structural monitoring of the columns at the Cathedral of Orvieto, July 2015. Conference: SHMII 2015 At: Torino Volume: RS9-Applicazioni and case studies project: studio e monitoraggio del quadro fessurativo e del comportamento sismico del Duomo di Orvieto.

ENEA TECHNOLOGIES FOR CULTURAL HERITAGE: MATERIAL CHARACTERIZATION

Use of the Terahertz radiation for cultural heritage analysis and conservation

E. Giovenale¹, A. Doria¹, G.P. Gallerano¹, M. Greco²

¹ ENEA – Frascati R. C. - FSN-PLAS-PAX

² Università di Roma Tre - Roma, Italy

Corresponding author: Emilio Giovenale - emilio.giovenale@enea.it

Keywords: THz radiation, subsurface detection, water detection, Art conservation

1. Abstract

In recent years, THz imaging techniques have been used in several fields of application. At the ENEA center in Frascati several THz sources are available and innovative imaging techniques have been developed to provide imaging tools for Art conservation in this spectral region. Applications in this field are related to the high penetration capabilities of THz radiation in dielectric materials and to its high sensitivity to the presence of water.

2. Experiments

The first THz imaging measurements, carried out at the ENEA center of Frascati in 2005, made use of a Compact Free Electron Laser that operated in the spectral region between 0.1 and 0.15 THz [1-2]. The ENEA portable system works in reflection mode and exploits the fact that reflection from the sample produces a phase shift of the impinging radiation that depends on the optical properties of the investigated material. The operating physical principle of the device is explained in detail in [3]. Experiments were carried out in framework of THz-ARTE project [4], confirming the ability of the THz radiation to penetrate a gypsum layer superimposed on a painting, clearly showing the underlying painting. Using this phase sensitive technique, it was also possible to distinguish different pigments, since different materials produce different phase shifts. More experiments were conducted, both in laboratory and *in situ*, on wood samples, in order to monitor the presence of holes and galleries made by wood-eating beetle larvae [5], and on frescoes [6] and mosaics [7], with more sophisticated techniques, able to compensate the phase changes induced by the non-planar surface of such manufacts. The last application of this technique was related to the characterization of leather wallpapers, used in the 16th and 17th centuries to decorate most of the noble residences in Rome and in the surrounding area [8]. At present measurements are scheduled to verify the possibility of monitoring water and humidity damages to such manufacts.

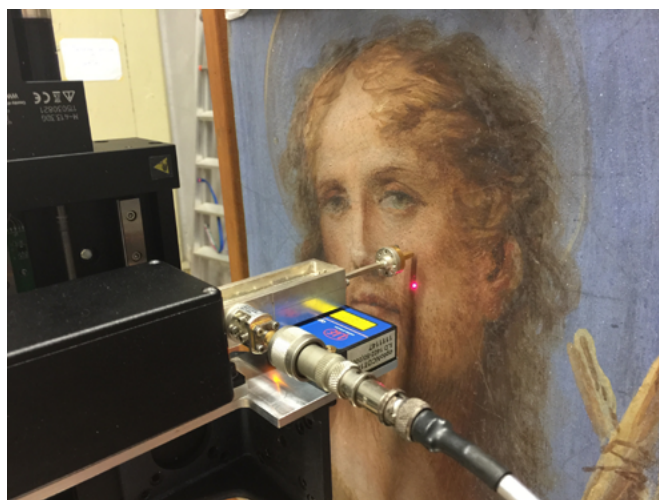


Figure 1: details of the ENEA 3D portable scanning system operating on a “fresco on tavola” by Alessandro Gherardini (1655–1726) [6]. Courtesy of San Marco Museum (Florence) and Restoration Laboratories of the Florence Uffizi Museum

3. Conclusions

The measurements conducted in the long wavelength part of the THz spectral range showed both potentiality and problems of the developed technique. Future developments include moving to higher frequencies and a simplification of the device design, when the target is water detection, that do not require the phase sensitive technique.

4. References

1. Doria, A.; Gallerano, G.P.; Giovenale, E.; Lai, A.; Messina, G.; Germini, M.; Spassovsky, I.; Valente, F.; D'Aquino, L. Reflective terahertz imaging at the ENEA FEL facility. In Proceedings of the Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, Williamsburg, VA, USA, 19–23 September 2005; pp. 255–256.
2. Doria, A.; Gallerano, G.P.; Germini, M.; Giovenale, E.; Lai, A.; Messina, G.; Spassovsky, I.; d'Aquino, L. Imaging in the frequency range between 100 GHz and 1 THz using Compact Free Electron Lasers. In Proceedings of the Joint 31st International Conference on Infrared Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, Shanghai, China, 18–22 September 2006; p. 161.
3. Gallerano, G.P.; Doria, A.; Germini, M.; Giovenale, E.; Messina, G.; Spassovsky, I. Phase-sensitive reflective imaging device in the mm-wave and terahertz regions. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves* 2009, 30, 1351–1361.
4. Gallerano, G.P.; Doria, A.; Giovenale, E.; Messina, G.; Petralia, A.; Spassovsky, I.; Fukunaga, K.; Hosako, I. THz-ARTE: Non-invasive terahertz diagnostics for art conservation. In Proceedings of the 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, Pasadena, CA, USA, 15–19 September 2008.
5. Bisceglia, B.; Doria, A.; Gallerano, G.P.; Giovenale, E.; Messina, G.; Petralia, A.; Spassovsky, I. An innovative non invasive technique for treatment of works of art. MM and THz waves for diagnostics and conservation. In Proceedings of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Rome, Italy, 5–10 September 2010.
6. Doria, A.; Gallerano, G.P.; Giovenale, E.; Casini, A.; Cucci, C.; Picollo, M.; Poggese, M.; Stefani, L.; Fukunaga, K.; Tamassia, M. Vis-NIR Hyperspectral and Terahertz Imaging Investigations on a Fresco Painting on “Tavella” by Alessandro Gherardini. *J. Infrared Milli Terahz Waves* 2017, 34, 390–402.
7. Doria A., Gallerano G.P., Giovenale E, Senni L., Greco M, Picollo M., Cucci C., Fukunaga k. and More A.C., An Alternative Phase-Sensitive THz Imaging Technique for Art Conservation: History and New Developments at the ENEA Center of Frascati, *Appl. Sci.* 2020, 10, 7661, ch.7
8. Petrucci, F. Palazzo Chigi di Ariccia: Parati in cuoio. In *Vestire i Palazzi. Stoffe, tessuti e Parati Negli Arredi e nell'arte del Barocco*; Rodolfo, A., Volpi, C., Eds.; Edizioni Musei: Vaticani, Città del Vaticano, 2015; pp. 249–282.

Surface scanning Raman spectroscopy: a non-invasive diagnostic protocol for the care, treatment and conservation of paper.

S. Botti, F. Bonfigli

ENEA - C.R. Frascati - FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: sabina.botti@enea.it

Keywords: Raman spectroscopy protocol, 2D Raman map, spectral imaging, care and conservation of paper

1. Introduction

Ancient papers with historical and literary interest represent a heritage of inestimable value, but they suffer of deterioration and degradation, both natural and accidental.

Preserving the “health state” of paper and preventing its aging processes represent a challenge for the scientific world that work in the field of cultural heritage. The aim of our work has been the development of a non-destructive diagnostic protocol based on Raman spectroscopy to characterize the health state of the paper. The non-invasiveness of a diagnostic technique is a fundamental aspect for studying papers of historical/literary interest; our protocol is based on Raman spectroscopy which is intrinsically non-destructive as it exploits the light-matter interaction.

Raman spectroscopy is a diagnostic technique that provides information on the chemical and structural composition of the sample. Furthermore, when an optical microscope is coupled to a Raman spectrometer, a spectral/compositional map could be overlapped to the corresponding optical image of the observed sample.

Our diagnostic protocol is based on spectroscopic indexes related to paper oxidation processes ($O_p = A_{(1640-1850)\text{cm}^{-1}}/A_{(1500-1600)\text{cm}^{-1}}$; $O_T = A_{(1500-2800)\text{cm}^{-1}}/A_{(700-3000)\text{cm}^{-1}}$) and paper hydrolysis/polymerization processes ($R_H = I_{1100\text{cm}^{-1}}/I_{1380\text{cm}^{-1}}$) [1].

This diagnostic protocol has been applied to several case studies characterizing the state of conservation/deterioration of different age papers. As example, Figure 1 shows an optical image of a part of a page from a 1893 book and the corresponding 2D spectroscopic maps related to the hydrolysis/polymerization index R_H and to the oxidation index O_p . Figure 1 shows that, especially for the oxidation index O_p , the spectroscopic map presents higher values along a specific fiber of the paper which is darker in the corresponding optical image (presumably due to its higher damaging). Furthermore, the effects of innovative cleaning treatments (with hydrogels, irradiation with UV and EUV radiation) have been studied in collaboration with DICMA Sapienza and laboratories of FSN Department (FSN-PLAS-PAX, Superconductivity section).

2. Abstract

In the field of care and conservation of paper, a non-invasive diagnostic protocol based on Raman spectroscopy has been developed. The experimental results have demonstrated that this diagnostic technique should be able to investigate the main aging and deterioration processes of paper.

3. Conclusions

The diagnostic protocol based on Raman spectroscopic indexes was applied for characterizing paper and obtaining two-dimensional spectral maps related to the oxidation and hydrolysis states of the paper under examination coupled with its optical images. This diagnostic protocol is particularly interesting not only for identifying the state of aging and degradation of paper of historical/literary interest, but also for studying and developing innovative methods of treatment and care.

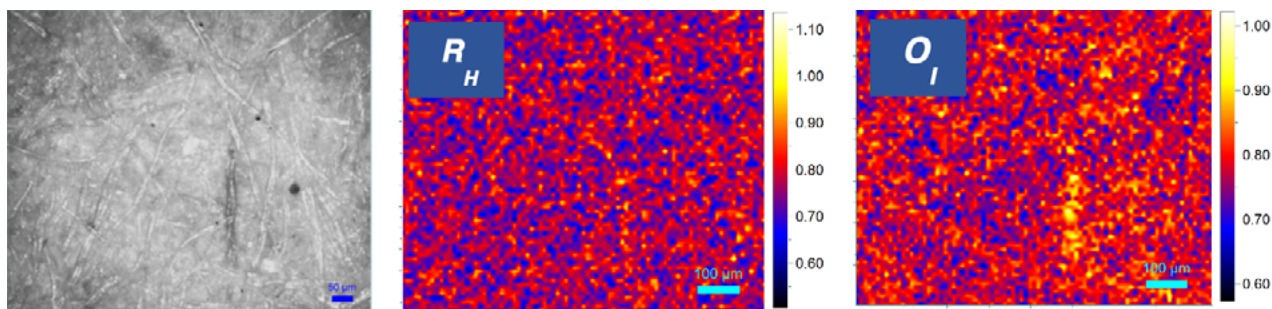


Figure 1: optical image of part a page of a 1893 book and the corresponding 2D maps of the Raman spectroscopic indexes related to its oxidation O_I and hydrolysis R_H processes.

4. Bibliography

1. Botti, S.; Bonfigli, F.; Nigro, V.; Rufoloni, A.; Vannozzi, A., Evaluating the Conservation State of Naturally Aged Paper with Raman and Luminescence Spectral Mapping: Toward a Non-Destructive Diagnostic Protocol. *Molecules* 2022, 27, 1712. <https://doi.org/10.3390/molecules27051712>.

Microstructural analysis with a micro- and non-destructive approach

D. Mirabile Gattia

ENEA, Casaccia R.C., SSPT-PROMAS-MATPRO

Corresponding author: daniele.mirabile@enea.it

Keywords: microstructural investigation, optical and electron microscopy, X-Ray diffraction

1. Abstract

Microstructural characterisation techniques allow the acquisition of useful information for the study of materials in the field of cultural heritage. In particular, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) can be used to investigate different types of materials, both organic and inorganic. This paper presents, as an example, some of the results obtained in the investigation of samples from the Villa della Piscina in Rome. The samples, also of considerable size, were studied with both a micro-destructive and non-destructive approach, using appropriate working conditions.

2. Introduction and discussion

Microstructural investigation techniques such as Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction, are suitable for organic and inorganic materials both. These techniques find application in a variety of sectors, including Cultural Heritage. Investigations generally require sample preparation. This is particularly true for SEM observations that take place under vacuum or partial pressure conditions. Under these conditions, in the case of non-conductive samples, charges accumulate on the surface of the sample causing image distortions. In contrast, when using an X-ray powder diffractometer, it is necessary to have samples in powder form or flat samples. Measurements can be conducted in air or in a controlled atmosphere, depending on the type of material being studied.

The samples from the Villa della Piscina analysed are fresco fragments. Direct SEM observations of the surface of the samples were carried out at the different pigments, using appropriate microscope operating conditions. Figure 1 shows the images acquired, which made it possible to identify, with the support of EDS analysis, two pigments of different grain size mixed together (malachite and celadonite). Similar investigations were conducted on other pigments [1].

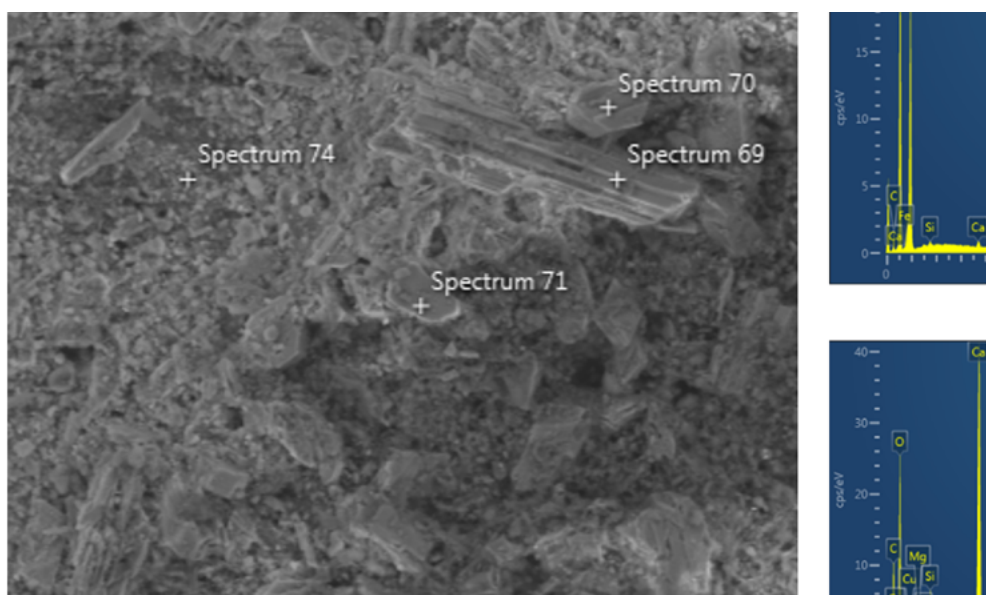


Figure 1: SEM images of malachite and celadonite particles with different grain size (a); EDS spectra for the two types of particles (b) and (c)

X-ray Diffraction made it possible to identify the crystalline phases of the compounds of both the different pigments and, in some cases, the underlying stucco layer.

3. Conclusions

The paper reports how two microstructural characterisation techniques, Electron Microscopy and X-Ray Diffraction, can be used synergistically, even in a non-destructive approach, for the direct observation of artistic heritage samples.

4. Bibliography

1. M. Sbroscia et al., *Microchemical Journal* 153 (2020) 104450

Study of paintings using non-destructive techniques. Two case studies related to the use of XRF

C. Seccaroni

ENEA, Casaccia R.C., SSPT-PROMAS-MATPRO

Corresponding author: claudio.seccaroni@enea.it

Keywords: XRF, paintings, barium, antimony, zinc, copper based pigments, strontium, gypsum, ground layer

1. Introduction

The ENEA Casaccia research center was among the first, also internationally, to equip itself with a system for in situ XRF analysis of artefacts of artistic interest. Initially, we operated with radioisotopic sources, subsequently; starting from 1988, a system was designed and created that made use of an appropriately collimated x-ray tube. This system remained operational until 2016, when it was replaced by a more compact industrially produced one. In over 35 years many work of art have been investigated, in Italy or abroad. Here we will focus on two cases concerning two paintings by Raphael in which the initial difficulties in interpreting the data were subsequently correctly overcome, highlighting the limits connected to the instrumental chains or the state of knowledge.

The first example concerns the Raphael's *Fornarina*, in the Galleria Nazionale di Arte Antica in Palazzo Barberini. Like many famous paintings, it was subjected to conservative and diagnostic particular attention, having been investigated with XRF in 1983, 2000 and 2020. In the first and second campaigns, point measurements were carried out using radioisotopic sources in 1983 and an x-ray generator in 2000, while in 2020 the painting has been scanned using MA-XRF. In 1983, antimony was identified on the turban and referred to the original context of the painting¹. On the contrary, barium, also on the turban, had been interpreted as associated with a 19th-century repainting. In any case, for both elements an estimate, even a rough one, of the actual quantities has not been carried out, while we know that, considering the fluorescence yields, particularly high in the adopted instrumental and working conditions, their limits of detection are very high, to the point of allowing their identification even in minimal traces.

The data acquired in 2000, with the now achieved awareness that they were impurities, made it possible to verify the existence of a correlation between the two elements.

Although it was not possible to produce, due to instrumental and operational limitations, concentration maps for antimony and barium, the 2020 MA-XRF campaign showed the systematic presence of copper and of zinc impurities over all the turban. By cross-referencing the data from the three campaigns it is therefore possible to attribute the zinc, barium and antimony impurities to the copper pigment used, probably azurite, a characteristic compatible with this mineral².

On Raphael's *Entombment* in the Borghese Gallery multiple XRF campaigns have been also performed: during the ICR restoration in 1966-72, then in 1983, 1995, 2004 and 2019. The first two campaigns made use of radioisotopic sources, the third and fourth X-ray tubes, the fifth MA-XRF. Since 1983 it was realized that on the *Entombment* the impurities of strontium – element associated to calcium and, consequently, to the gesso ground on the panel support – appeared decidedly higher than usually found on other panel paintings, as result of either higher thicknesses of the gesso ground layers or a gesso richer in these impurities. In 2019 the crossing of the MA-XRF maps with radiographs, reflectographs at different wavelengths and a careful study of the support showed in the strontium distribution great variations in concentration, sensibly higher where the support had joints or structural defects. This

¹ We currently know that the Naples yellow (lead antimoniate), with some rare exceptions, is not consistent with a 16th-century context.

² Cfr. A. Cosma, C. Merucci, S. Ridolfi (a cura di), *Raffaello da vicino. Nuove indagini e nuove scoperte sulla Fornarina*, Roma 2023.

leads to the conclusion that before starting to paint the artist had partially removed the preparatory layers to repair the opening of the joints between the boards and gesso lifting. The gypsum used had different levels of strontium impurities than that used previously, but this does not imply a different origin, as strontium impurities are highly variable even within the same deposit.

Moreover, being in depth, the contribution of strontium is partially shielded by the paint layers, and this therefore also provides an estimate, albeit rough and indirect, of the thickness of the overlying paint layers. The presence of an important pentimento, with the elimination of a figure in the centre, corresponding to the landscape, had been known for some. The strontium concentration maps accurately showed this pentimento, better than with previous diagnostic imaging. Cross-referencing the information from the MA-XRF, radiographs and IR reflectographs, it emerged that the painter drew this figure on the preparatory ground, then proceeding to spread the first layers of colour in the adjacent landscape but not on the figure itself. Once he decided to eliminate it, he covered everything with subsequent pictorial layers of the landscape³. So, the interpretation of a result, or the simple possibility of obtaining it, is closely associated with the instrumental and operational characteristics, as well as the knowledge and interpretative skills of the operators, and that for an optimal outcome, the integration of skills and information derived from broader cognitive and diagnostic contexts.

2. Abstract

The text focuses on two case studies concerning the XRF analysis of panel paintings. The first example shows how integrated information on a copper-based blue pigment was obtained through the integration of measurement campaigns over around 40 years. In fact, the use of radioisotopic sources or X-ray tubes involves different sensitivities and detection limits. The final integration was possible through MA-XRF, whose limits of detection are lower than point measurements. The second example shows how the study of the systematic strontium impurities in the gypsum of the ground layers can provide information on the reworking of the panel support and, considering the shield effect, provide a visual reading of the presence of a pentimento.

³ Cfr. R. Alberti, et al., *From noise to information. Analysing macro-XRF mapping of strontium impurities in Raphael's Baglioni Entombment in the Galleria Borghese, Rome*, 'Journal of Cultural Heritage', vol. 58, November–December 2022, pp. 130-136. ISSN 12962074; DOI:10.1016/j.culher.2022.10.001.

Applications of Raman Spectroscopy in the field of Cultural Heritage

A. Puiu

ENEA, Frascati R.C., FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: adriana.puiu@enea.it

Keywords: Cultural Heritage, Raman spectroscopy, non-destructive analysis, pigments, restoration.

1. Abstract

The Diagnostics and Metrology Laboratory at ENEA Frascati has years of experience in various fields of diagnostic applications of Raman spectroscopy, particularly in the field of Cultural Heritage. In this work, we provide some of the results obtained by the portable Raman apparatus available in our laboratory during various measurement campaigns carried out as part of research projects funded by the Lazio Region (e.g., ADAMO Project and COBRA Project).

2. Introduction

ENEA's involvement in the field of Cultural Heritage is primarily demonstrated through the results obtained using optical spectroscopic techniques for diagnostic purposes. This activity strongly aligns with the mission of the Diagnostic and Metrology Laboratory of the Nuclear Safety and Security Department at ENEA Frascati. In particular, this report stems from an intensive experimental application of Raman spectroscopy (both in the laboratory and in-situ), an inherently non-destructive optical technique, to various issues presented by important works of art, such as ancient frescoes found in various churches and catacombs [1-3]. To address the questions posed, a non-destructive method was required for pigment identification in order to assess the artwork's preservation status, the originality of colors, the potential layering of retouches, or even to determine the ideal pigment to use in a targeted and precise restoration effort.

Raman spectroscopy is a non-destructive optical technique for molecular analysis based on the inelastic scattering of laser light, revealing differences between the frequency of the incident light and the frequency of the scattered light, corresponding to the excitation of specific vibrational modes. By measuring the intensity of scattered light as a function of frequency differences, a Raman spectrum is obtained, providing information about the chemical structure of molecules.

3. Results and discussion

Among the cases considered by our Laboratory is the apse of the Church of San Nicola in Carcere, dating back to the medieval period and frescoed by Vincenzo Pasqualoni between 1865 and 1866. For this artwork, we were able to identify the pigments used in the red sleeves and pink tunics of the angels. The portable Raman apparatus i-Raman model by BWTek Inc. was used for the in-situ experimental measurement campaigns. Specifically, we identified the chemical compounds Fe_2O_3 , PbCrO_4 and CaCO_3 in different proportions to achieve various shades of pink and red [1]. This identification was based on assigning the Raman peaks observed in the spectrum of the analyzed areas to the basic chemical compounds. On the same fresco, we detected the presence of yellow ochre (goethite $\alpha\text{-FeOOH}$) used to create orange and yellow pigments, as well as the presence of gypsum (CaSO_4) and chromium oxide (Cr_2O_3) used for the green sleeves (Figure 1). In many cases, the presence of a high background fluorescence prevented us from highlighting Raman peaks associated with the pigments used.

Other examples of cases we have handled include the frescoes G6 and G15 found in the Roman-era Catacombs of San Alessandro, a monumental complex discovered through archaeological excavations in 1854. We have also worked on the Tomb of the Blue Demons, an Etruscan burial site recently discovered in the Monte Rozzi Necropolis (Tarquinia, VT) dating back to the 4th century BC. In this tomb, various pigments of red, blue, and green were used to depict demonic figures haunting

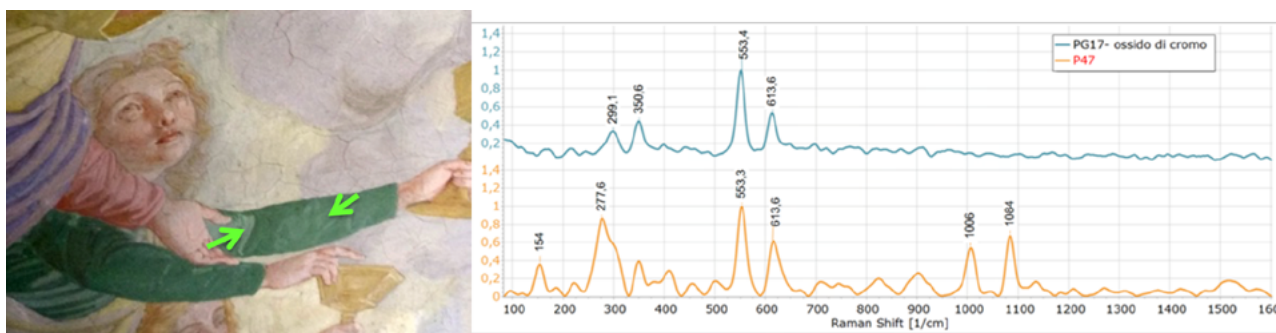


Figure 1: Apse of the Church of San Nicola in Carcere, Analysis of Green Pigments (Raman spectra of the green pigment on the fresco compared with PB47 - Cr_2O_3 pigment).

the scene. In these cases as well, the correct use of Raman spectroscopy allowed us to identify basic chemical compounds.

Furthermore, we had the opportunity to characterize some materials on the surface of marble works, notably the Sarcophagus of the Two Orants in the Museum of the Catacomb Sarcophagi of San Sebastiano. In this instance, the material used for previous restoration work was found to be Araldite, an epoxy adhesive that cures at room temperature. Additionally, we analyzed the bust of Cardinal Flavio Chigi created by Bernardo Fioriti and preserved in the Chigi Palace of Ariccia. The Raman spectra of the analyzed areas were found to be more similar to a mixture of beeswax and carnauba wax than to individual compounds.

Finally, we should mention the possibility of identifying biodeterioration on archaeological marble artifacts attacked by cyanobacteria by assigning specific Raman peaks to substances such as chlorophyll and anthraquinone.

4. Conclusions

In conclusion, thanks to its advantages (i.e., speed of measurement, molecular specificity, non-invasiveness, no sample preparation required, compatibility with fiber optic operations for in-situ studies), Raman spectroscopy can be successfully applied to the analysis of a multitude of materials of artistic and archaeological interest, including stone materials, pictorial materials (pigments, dyes, inks), wood, ceramics, glass, gemological artifacts, restoration materials, etc.

5. Bibliography

1. M. Romani et al., Analytical chemistry approach in cultural heritage: the case of Vincenzo Pasqualoni's wall paintings in S. Nicola in Carcere (Rome), *Microchemical Journal*, 156 (2020) 104920, ISSN 0026-265X, <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104920>.
2. M. Romani, et al., Raman and Time-Gated-Lif Spectroscopy for the Identification of Painting Materials, *J Appl Spectrosc* 86 (2019) pp.360–368 <https://doi.org/10.1007/s10812-019-00826-0>
3. S. Almviva et al., Raman/XRF/EDX microanalysis of 2nd-century stuccoes from Domus Valeriorum in Rome, *Journal of Cultural Heritage* 37 (2019) pp. 225-232, ISSN 1296-2074, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.11.004>.

Diagnoses of ancient timber elements in situ and in laboratory

B. Carpani, G. Marghella, A. Marzo, C. Tripepi

ENEA, Casaccia R.C., SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: anna.marzo@enea.it

Keywords: on-site survey; timber structural identification; ND test

1. Introduction

Timber structures play a very important role within the monumental buildings, particularly for large span floor beams. Being complex structures, the identification of the static schemes and the knowledge of the materials are the bases for their preservation. In this regard, several studies have been carried out to set up a proper investigation methodology [1,2] which includes, firstly, an in depth geometrical and visual survey, followed to in situ nondestructive (ND) investigations, in addition to laboratory destructive tests on any removed elements. As a result, timber structures mechanical behaviour will be obtained. In the following, the application of the above methodology on two emblematic case studies is synthetically shown.

2. Abstract

The structural identification of the tower of Montorio in Bolognese Appennines (Italy) [3,4] has been developed in two phases (Figure 1): *in situ* non-destructive investigation and in laboratory both non-destructive and destructive tests. *In situ* investigations consisted of hygrometric, ultrasonic (US), sclerometric (S) and resistographic (R) analysis, whereas in laboratory bending tests up to failure have been performed. In both phases, a preliminary in depth visual and geometrical survey has been carried out, to obtain a visual grading.

Aiming at preserving the archeological site of Pompeii (5), ENEA, in collaboration with the Pompeii Superintendence, has analyzed the preservation state of the covering structures of the “Villa dei Misteri”.

The in situ investigation campaign has regarded the whole system (timber, r.c. and steel elements) realized in the past years to preserve the remaining parts of the villa (Figure 2).

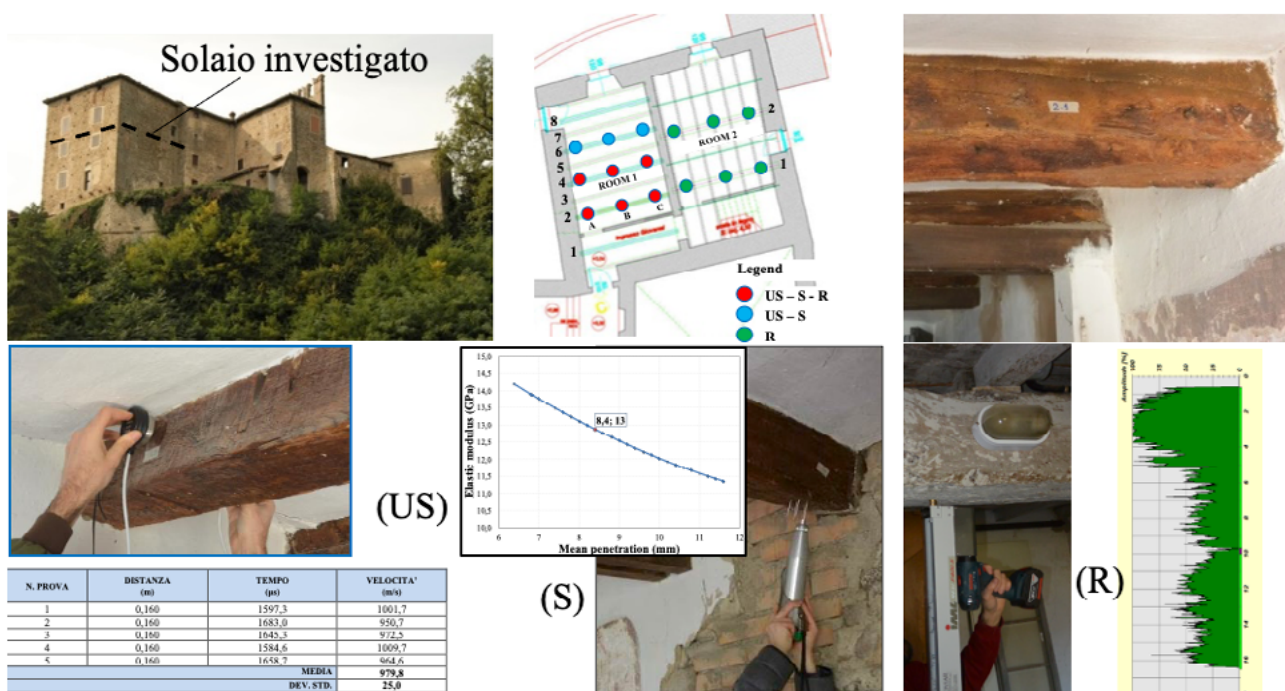


Figure 1: In situ NDT of the Tower of Montorio (Bologna).

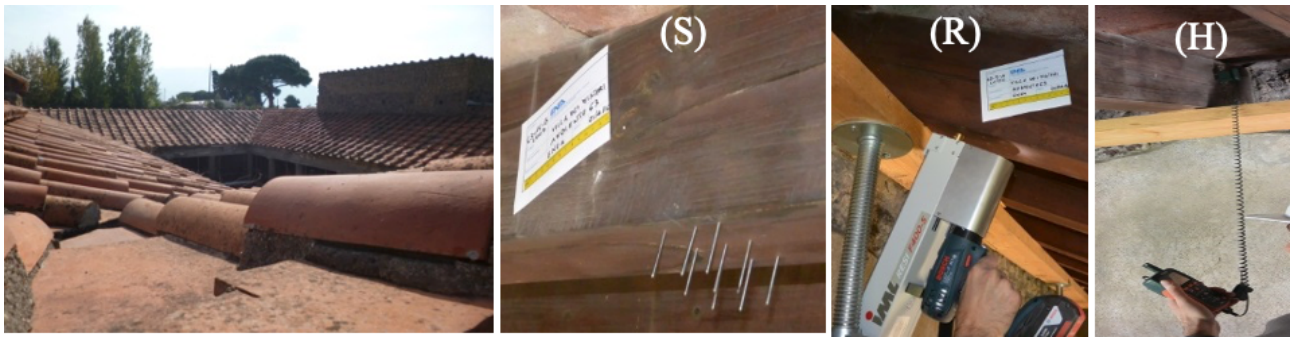


Figure 2: In situ NDT of the covering structures of Villa dei Misteri (Pompeii).

3. Conclusions

On the basis of the good relationships achieved between non-destructive and destructive results, non-destructive techniques appear to be a useful supplement to the traditional visual grading. They allow a reliable mechanical identification (aimed at the practical applications) of the timber members leading to the appraisal of the structures integrity.

4. References

1. Faggiano, B., Marzo A., & Mazzolani F.M., The Diplomatic Hall of the Royal Palace of Naples: Structural characterization of the timber roof by in situ ND investigations. *Construction and Building Materials*. 171 (2018). DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.174
2. Faggiano, B., Marzo A., Grippa M.R., Iovane G., Mazzolani F.M., & Calicchio D. The inventory of structural typologies of timber floor slabs and roofs in the monumental built heritage: the case of the Royal Palace of Naples. *International Journal of Architectural Heritage*. 12, 683- 709 (2018). DOI: 10.1080/15583058.2018.1442525
3. Carpani B., “The Restoration of the Tower of Montorio, Italy, after the 2003 earthquake”, EAI, 3-4, 2013, ENEA, pp. 52-63, DOI: 10.12910/EAI2013-08, 2013.
4. Marzo A., Marghella G., Tripepi C., Bruni S., Carpani B., “ND in situ tests and laboratory experimental campaign on the timber beams of the tower of Montorio in Bolognese Apennines”. 3rd International Conference on protection of historical construction (PROHITECH), Lisbona 2017, ISBN: 978-989-8481-58-0
5. Bergamasco I., Marzo A., Marghella G., Carpani B., “In-situ experimental campaign on the covering structures of “Villa dei Misteri” in Pompeii”. *Journal of Civil Structure Health Monitoring*, (2018) Springer. ISSN 2190-5452, DOI: <https://doi.org/10.1007/s13349-018-0274-7>

Characterisation of samples from Cultural Heritage by SEM

G.Marghella, S.Bruni, A.Gessi

ENEA – Casaccia R. C. - SSPT-MET-DISPREV

Corresponding author: giuseppe.marghella@enea.it

Keywords: Scanning Electron Microscopy, EDX microanalysis

1. Introduction

The SSPT-MET-DISPREV Electron Microscopy laboratory of the Bologna ENEA centre is equipped with a Quanta Inspect S microscope for the observation of samples, coupled with an Oxford Instruments Xplore microanalysis for their chemical characterization. This instrument allows the non-destructive analysis of objects up to a few centimetres without any preparation, with magnifications that can reach 20,000X in optimal conditions. These characteristics make this instrument particularly suitable for the study of objects of historical and artistic interest, such as jewels, coins, micro-samples of material picked up from works of art and degradation products such as encrustations or corrosion. In recent years, samples of textile fibres, pigments, fragments from musical instruments, stained glass and architectural elements have been characterized.

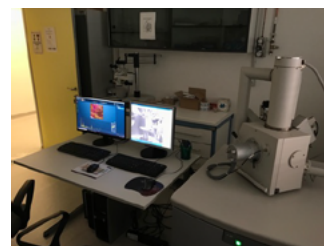


Figure 1: the Scanning Electron Microscopy laboratory

2. Case studies

In Figure 2 a wool fibre picked up from a fabric dating back to the 13th century can be observed. The fabric was analysed to evaluate its state of conservation and the study allowed to establish that the lighter-coloured fibres of the fabric were well preserved, while the darker ones showed damages probably due to fungal attacks.

Figure 3 shows the SEM image of a cross section of the painting layers found on an 18th century painting attributed to Gaetano Gandolfi. The microanalyses on the different layers made it possible to identify both the nature of the primer and the pigments used for the creation of the painting, lead white (lighter in colour in the image), red lead (in the middle layer) and different iron oxides (bottom) for the reds.

Figure 4 shows a wood fragment taken from the sound box of the precious Barberini harp, whose characteristics allowed the identification of the wood species used to realise the instrument as maple, an information useful for the reproduction of the instrument.

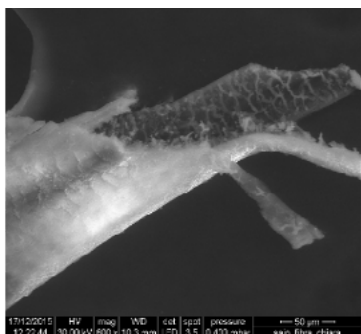


Figure 2: painting layers

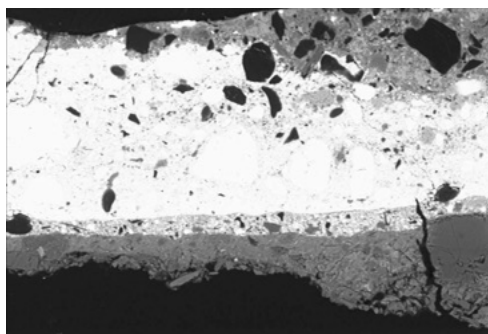


Figure 3: wool fiber

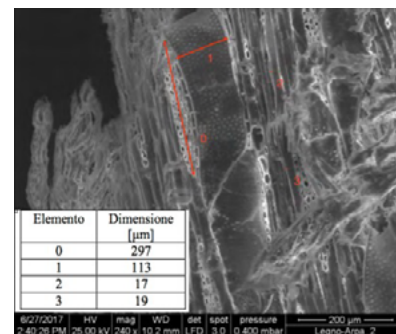


Figure 4: fragment of wood

3. Conclusions

The briefly illustrated case studies highlight the great potential of the Scanning Electron Microscopy in the study Cultural Heritage materials and the flexibility of the technique, that can be applied to a wide range of samples.

Characterization of cultural heritage materials by Laser Induced Fluorescence (LIF)

L. Caneve

ENEA, Frascati R.C., FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: luisa.caneve@enea.it

Keywords: Laser Induced Fluorescence, LIF, Cultural Heritage.

1. Abstract

The laser-induced fluorescence (LIF) spectroscopic technique is widely used for diagnostic analysis in the field of Cultural Heritage. The spectral analysis of the radiation coming from the examined surface provides information on the composition of the surface layer. Various tools based on this technique have been developed in the Diagnostics and Metrology Laboratory (DIM) of ENEA Frascati and applied *in situ* on artworks of different materials.

2. Introduction

As part of the multidisciplinary activities that ENEA carries out aimed at the knowledge, conservation, use and enhancement of the country's cultural heritage, the Diagnostics and Metrology Laboratory of Frascati has developed scanning LIF sensors, easily transportable, operating remotely and non-invasive [1, 2]. These tools allow mapping surface materials, identifying and localizing different materials used, for example, for restoration operations, such as additions and renovations, which have occurred over time [3]. This is also possible thanks to the use of algorithms developed ad hoc and applied in the data post-processing process [4]. The technique is applicable to different types of materials used in Cultural Heritage, such as marble, wood, wall paint, bio-attacks and organic and inorganic restoration materials. The diagnostic analysis using the LIF sensors of the ARES Ludovisi statue at Palazzo Altemps in Rome, for example, made it possible to highlight inserts of different marbles in some areas of the statue itself (Figure 1).



Figure 1. LIF sensors at Palazzo Altemps (left); LIF image of Ares Ludovisi after data processing (right).

3. Conclusions

The LIF sensors developed by ENEA constitute a rapid, non-destructive investigation system that can be used in situ and are therefore particularly advantageous for applications in the field of Cultural Heritage. The results obtained are the result of teamwork within the Diagnostics and Metrology Laboratory.

4. References

1. F. Colao, L. Caneve, R. Fantoni, L. Fiorani, A. Palucci, Lasers in the Conservation of Artworks, in: M. Castillejo, P. Moreno, M. Oujja, R. Radvan, J. Ruiz (Eds.), Boca Raton, US, 2008
2. L. Caneve, F. Colao, M. Del Franco, A. Palucci, M. Pistilli, V. Spizzichino, 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 (November 16, 2016 <http://dx.doi.org/10.1117/12.2240924>)
3. L. Caneve, F. Colao, R. Fantoni, L. Fiorani, Scanning lidar fluorosensor for remote diagnostic of surfaces, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 720 (2013) 164–167.
4. V. Spizzichino, L. Bertani, L. Caneve, Origin determination of mediterranean marbles by laser induced fluorescence, M. Ioannides et al. (Eds.): EuroMed 2018, LNCS 11196, pp. 212–223, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01762-0_18

ENEA ACTIVITIES FOR CULTURAL HERITAGE

Strategies and tools for the management and integrated enhancement of archaeological heritage in suburbs

B. Calosso

ENEA –Frascati R. C. - TERIN-ICT-HPC

Corresponding author: beatrice.calosso@enea.it

Keywords: Archaeology, Urban Regeneration, Urban Development Planning, Restoration.

1. Abstract

The historicized function given by the continuity of use [1], which over the centuries has filled with meaning the stratified archaeological remains in the city centre, is missing in most of the sites in the peripheral areas of the south-eastern sector of Rome. Here the ruins are isolated in former agricultural areas, enclosed in fences [2], surrounded by the built, abandoned and therefore deprived of any connection with the contemporary context, with the consequent loss of recognition of its historical and cultural value. The research conducted within a PhD aimed at identifying a methodological approach to support future restoration and enhancement of ruins in densely urbanized areas, which implied the replicability of some management strategies, integrated into the urban regeneration plans provided for in the current Urban Development Plan of Rome.

2. The methodology developed

In the investigation carried out it was chosen to proceed from a first consideration of semantic type: the ruin today takes on meaning as part of a collective memory [3], typical of the community that inhabits a territory. This attribution derives from a path of stratigraphic knowledge, which must proceed considering the vestiges as a part of the history of a district and of its cultural complexity, ending with the reconnection of archaeological evidence to the entire Cultural-Territorial System [4]. In practice, this process leads to a new approach to the planning of the management of suburban archaeological sites [5], in which citizens, collaborating with the authorities responsible for urban planning and experts, take a proactive role at all its phases. The management defined as ‘integrated’ combines conservation and enhancement and has as its goal – and its major difficulty - to update the actions aimed at reconnecting the ancient manufact with an urban-social context in continuous transformation, such as the roman suburbs. Therefore, the aim of the research carried out was to develop a methodology to select among the most recent integrated management strategies, applied in restoration works carried out in the European context, those capable of overcoming the nineteenth-century conception, still predominant, which prefers as protective measures the isolation of the remains, or the earth layer [6]. To assess the integrability of the strategies identified in the real situation of Rome, following the UNESCO guidelines [7], the SWOT analysis methodology has been applied to assess strengths, weaknesses, opportunities, risks, and threats of a given ruin in relation to its context. In particular, the analysis examined the urban regeneration projects provided in the current General Urban Development Plan (2008) for the suburbs (*Città da Ristrutturare* [8] and *Centralità Locali* [9]), consistent with the methodological approach recognized at international level, for the integration of interventions for the conservation and enhancement of cultural sites in a sustainable urban planning, which gives them the role of ‘driving force’ of urban revitalization [10].

3. Conclusions

The SWOT analysis applied to districts undergoing regeneration plans has allowed to identify the most suitable strategies for the peculiarities of about 100 archaeological sites surveyed during the PhD, in relation to their own specific cultural-territorial system. It is concluded that the strategies Ecomuseum [11] and Widespread Museum [12] are among the most effective in combining the needs of conservation, fruition and knowledge¹³ of the ruins distributed in the south-eastern Roman suburbs, with the needs of the latter and of the citizens living there.

4. References

1. D. Manacorda, Archeologia in città fra ricerca, tutela e valorizzazione, in Atti del Convegno Emergenza sostenibile. Metodi e strategie per l'archeologia urbana, Bologna, 27 March 2009, in *Groma*, 3, 2010.
2. A. Ricci, Attorno alla nuda pietra: archeologia e città tra identità e progetto, Donzelli, Rome, 2006.
3. M. Halbwachs, La memoria collettiva, Unicopli, Milan, 2001.
4. F. Mangoni di Santo Stefano, La costruzione dei sistemi culturali territoriali, Edizioni scientifiche Italiane, Napoli, 2009.
5. L. Manfra (a cura di), Il Teatro Romano di Ferento. Un progetto di gestione per la valorizzazione di un sito del Lazio, Gangemi Editore, 2012.
6. A. Ricci, I mali dell'abbondanza, considerazioni impolitiche sui beni culturali, Lithos, 1996.
7. The applicability of the SWOT analysis in the specific field is deduced from the guidelines for the management and enhancement of UNESCO sites WHC- 11/18.GA/11, Future of the World Heritage Convention, Paris, 1 August 2011: whc.unesco.org/115441; Project to define a model for the realization of the Management Plans of the UNESCO sites, Ministry of Heritage and Cultural Activities, Ernst & Young Financial Business Advisor S.p.A., Rome, January 2005.
8. Reference plans for the city to be restored. Rome City Council decides on adoption, March 2003 (http://www.urbanistica.comune.roma.it/images/uo_urban/prg_adottato/I1.pdf) (2022)
9. Master plan, Reference scheme for local centres, Municipality of Rome 2003 http://www.urbanistica.comune.roma.it/images/uo_urban/prg_adottato/I2.pdf (2022)
10. With the adoption of the 2030 Agenda for Sustainable Development, the international community and UNESCO have recognised the role of culture as a driver of sustainable development and urban revitalisation based on Cultural Heritage (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000264687>)
11. C. Grasseni, Ecomuseo-logie. Interpretare il patrimonio locale, oggi, in *Ecomuseo-logie. Pratiche e interpretazioni del patrimonio locale*, Guaraldi, 2010, pp. 9-18.
12. A. Tricoli, Siti archeologici urbani: Integrare/Proteggere/Evidenziare/Rilevare, in, *Mostrare L'Archeologia. Per un manuale-atlante degli interventi di valorizzazione*, edited by M. Vaudetti et al., Allemandi & C., 2013, pp. 61-74.
13. P. Diaz Pedregal, Sites Archéologiques et Conservation, in *Urban Pasts and Urban Futures: Bringing Urban Archaeology to Life Enhancing Urban Archaeological Remains*, International and Interdisciplinary Symposium, Bruxelles, 2005, pp. 29-35.

Hydrogels for dye micro-extraction from paintings and textiles

V. Nigro

ENEA - C.R. Frascati - FSN-TECFIS-MNF

Corresponding author: valentina.nigro@enea.it

Keywords: hydrogels, micro-extraction, UV-Vis-NIR spectroscopy

1. Introduction

Non-invasive identification of organic substances is a challenging task in cultural heritage when sampling is forbidden. In particular, organic dyes are hardly detectable because of their low concentration and tendency to fade. Hydrogels retention and release properties make them suitable for non-invasive microextraction of dyes directly from the artifact. Hydrogels are indeed three dimensional cross-linked polymer networks able to absorb and retain large amount of water that attracted great interest in the last years for their applications in cultural heritage.

2. Abstract

Agar-gel is a natural polysaccharide hydrogel that has been recently proposed for dye microextraction procedure and subsequently used as substrate for SERS analysis allowing non-invasive identification of organic substances in cultural heritage. To investigate its efficiency, a systematic investigation has been performed in collaboration with Dr. A. Ciccola from the Chemistry Department of Sapienza University. Transmittance spectra in the UV-Vis-NIR range have been collected on Agar-gels at different concentrations before and after the dye extraction both on the paint layer and textile mock-ups containing madder lake pigment. The lower transmittance observed in the samples post-extraction than in the samples pre-extraction indicated the absorption from additional compounds extracted from the surface mock-ups. The spectra of Agar-gel after extraction showed a wide absorption band between 480 nm and 550 nm, which is due to the electron transitions of carbonyl groups in the chromophore alizarin [1], and a major capability of extracting dyes from paint rather than textile [2].

UV-Vis spectroscopy performed on the laboratory mock-ups has contributed in the choosing of the most suitable concentration for application on a textile fragment from the red area of the frame of a XIX century painting discovered in the “Ospitale Santa Francesca Romana” in Rome (Fig.1(a)). The UV-Vis transmittance spectrum of Agar-gel after dye extraction showed a decrease in transmittance between 500 nm and 550 nm that can be ascribed to the characteristic signal of madder dye, also by comparison with reference spectra of the madder mock-up (Fig.1(b)).

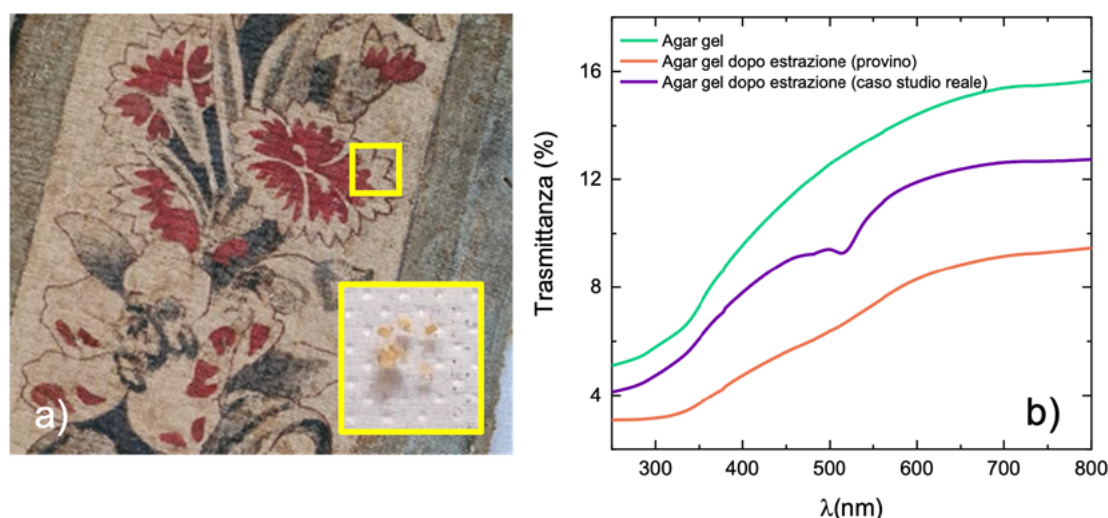


Figura 1: (a) Textile fragment from the frame of the XIX century painting and (b) UV-Vis transmittance spectra of Agar-gel at $C_w = 3\%$, before and after extraction from the madder paint mockup and from the textile fragment from the XIX century painting.

3. Conclusions

UV-Vis spectroscopy allowed to identify madder dyes directly on the gel samples validating their use for non-invasive microextraction procedures. Moreover, a few physical properties of the gel network that can be easily related to the extraction capability have been identified: the lowest the Agar-gel concentration, the highest the amount of extracting solution released, with consequent dye extraction. This investigation allowed to identify the ideal properties of Agar-gels for application on valuable artefacts such as the linen fragment from the tomb of Pharaoh Tutankhamun [2].

4. Bibliography

1. A. Bosi, A. Ciccola, I. Serafini, G. Peruzzi, V. Nigro, P. Postorino, R. Curini, G. Favero, Gel microextraction from hydrophilic paint layers: A comparison between Agar-gel and Nanorestore Gel® HWR for spectroscopic identification of madder *Microchemical Journal* (2023) 187, 108447.
2. G. Peruzzi, A. Ciccola, A. Bosi, I. Serafini, M. Negozio, N.M. Hamza, C. Moricca, L. Sadori, G. Favero, V. Nigro, P. Postorino, R. Curini, Applying Gel-Supported Liquid Extraction to Tutankhamun's Textiles for the Identification of Ancient Colorants: A Case Study *Gels* (2023) 9, 514.

RGB-ITR and IR-ITR: two laser scanner prototypes for fruition, study, monitoring and diagnostics of Cultural Heritage

M. Francucci, M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Ciaffi, M. Nuvoli, M. Pistilli

ENEA - Frascati R.C. - FSN-TECFIS-DIM

Corresponding author: massimo.francucci@enea.it

Keywords: laser scanner, imaging 3D, IR reflectography

1. Introduction

The accessibility, fruition, diagnostics and monitoring of Cultural Heritage (CH) play a fundamental role in the field of dissemination, knowledge, enhancement, conservation and safeguard of art not only for the community of sector experts but also for interested people. The technology can be extremely useful for achieving these purposes through the employment of cutting-edge techniques such as laser scanner that allow accurate, high-resolution digitalization of artworks, especially in the visible and infrared spectral range [1, 2]. In this work the RGB-ITR and IR-ITR prototypes of laser scanners [3-7], developed in the ENEA Research Center of Frascati (Rome) in the DIM (Diagnostics and Metrology) Laboratory, are presented.

2. RGB and IR-ITR prototypes

The RGB-ITR (Red Green Blue Imaging Topological Radar) is a laser scanner system based on the active range-finding laser-radar technique. It operates in the visible region using three amplitude-modulated laser beams (red @ 660nm, green @ 517nm and blue @ 440nm) focused and superimposed to illuminate and scan the target whose backscattered light is captured by the instrument. It is an innovative laboratory prototype with a monostatic optical layout and a configuration at two physically separated modules (system optics and electronics) optically connected by optical fibers. The RGB-ITR finds its main application in the CH field permitting to obtain the high-accuracy, faithful, 3D color digitalization of artworks even of large sizes with a maximum image resolution of the order of Giga Pixels and a sub-millimeter spatial resolution up to a distance of 10/15m. The system operates between 2 and 35 m without scaffoldings on a huge variety of materials both day and night (h24) providing the same results. Its maximum sampling rate is 10,000 points per second. The obtained 3D color models are fully navigable, permitting to achieve very high zoom levels without losing resolution. The models are not affected by external lighting conditions, are characterized by the absence of shadows and the distortions are minimized. The artwork scanning takes place remotely, with an optical power of about 5mW, without any damage being produced. The RGB-ITR acquires distance (structure) and color (RGB reflectivity) information for each sampled point, permitting a metric/structural and colorimetric analysis of the investigated pieces of art. The IR-ITR system (InfraRed ITR) is a laboratory prototype of amplitude-modulated laser scanner working at a modulation frequency of 300kHz in the IR region at a wavelength of 1550nm with an optical power of 10mW. It uses the same operating principle of the RGB-ITR though can only record the information on the reflectivity of the investigated target with high reliability due to the low value of the modulation frequency. The IR-ITR operates without scaffoldings between 2 and 10 m and not being affected by ambient lighting conditions. By exploiting the higher penetration capacity of the used infrared radiation compared to the visible one, the IR-ITR allows to detect and highlight hidden details and artist's afterthoughts/corrections not visible to the naked eye that could be present below the superficial pictorial layer.

3. Conclusions

The two ENEA prototypes of the RGB-ITR and IR-ITR laser scanners were presented. High-resolution (less than 1mm) 3D color models of the investigated artistic asset were obtained by the RGB-ITR showing details of particular interest and structural/colorimetric alterations working at distances from a few meters up to 35m for fruition, digital storage, dissemination, safeguard, diagnostics, and



Figure 1: High-resolution 3D color model of the South Wall and of a part of the West one of the Muse Hall (Villa Sora, Frascati, Rome) obtained by RGB-ITR (ATAP project).

monitoring purposes. By exploiting the penetration capacity of the IR radiation below the surface pictorial layer, high-resolution images (of the order of mm) of IR reflectography were obtained by the IR-ITR, showing the presence of hidden details and artist's afterthoughts/corrections that cannot be observed in the visible. It is also possible to carry out a multispectral investigation (visible + IR) and a differential study (i.e. over time) of the state of conservation of the artworks to identify the areas that could be interested to restoration works.

4. References

1. G. Sansoni, M. Trebeschi, and F. Docchio, "State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry, cultural heritage, medicine, and criminal investigation," *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, 2009.
2. R. Fantoni, S. Almaviva, L. Caneve, M. Caponero, F. Colao, M. Ferri De Collibus, L. Fiorani, G. Fornetti, M. Francucci, M. Guarneri, V. Lazić, A. Palucci, V. Spizzichino, "Laser scanners for remote diagnostic and virtual fruition of cultural heritage," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 120, pp. 1–21, 2017.
3. M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, G. Fornetti, M. Francucci, M. Nuvoli, and R. Ricci, "Remote Colorimetric and Structural Diagnosis by RGB-ITR Color Laser Scanner Prototype," *Advances in Optical Technologies*, vol. 2012, p. 512902, 2012.
4. S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Ferri De Collibus, M. Francucci, M. Ciaffi, and A. Danielis, "Laser scanners for high-quality 3D and IR imaging in cultural heritage monitoring and documentation," *Journal of Imaging*, vol. 4, no. 11, 2018.
5. S. Ceccarelli, M. Guarneri, M. Romani, L. Giacomini, M. Francucci, M. Ciaffi, M. Ferri De Collibus, A. Puiu, G. Verona-Rinati, F. Colao, R. Fantoni, "Are the blue daemons really blue? Multidisciplinary study for the colours characterization of the mural paintings inside the Blue Daemons Etruscan tomb", *Journal of Cultural Heritage* 47 (2021), 257 – 264.
6. S. Ceccarelli, M. Guarneri, N. Orazi, M. Francucci, M. Ciaffi, F. Mercuri, M. Ferri de Collibus, U. Zammit, F. Petrucci, "Remote and contactless infrared imaging techniques for stratigraphical investigations in painting on canvas", *Applied Physics B* 127, Number 106 (2021), 13 pages, <https://doi.org/10.1007/s00340-021-07654-1>.
7. S. Ceccarelli, M. Francucci, M. Ferri De Collibus, M. Ciaffi, R. Fantoni, R. Carmagnola, G. Adinolfi, M. Guarneri, "Comparative study of historical and scientific documentation of the paintings in the Querciola Tomb in Tarquinia", *Journal of Cultural Heritage* 61 (2023), 229–237.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
Laboratorio Tecnografico - Centro Ricerche ENEA Frascati

www.enea.it



enea.it