

TRAIETTORIA 4. TECNOLOGIE PER LA CONSERVAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE

1. Introduzione

La traiettoria 4 si pone come obiettivo lo sviluppo di materiali, tecnologie e prassi innovative da investire nel settore della conservazione e del restauro del patrimonio, ai fini di garantirne l'integrità, l'identità e l'efficienza funzionale, in maniera coerente, programmata e coordinata.

Partendo da ricerche e pratiche consolidate si individuano e indirizzano percorsi innovativi e interventi di conservazione dei beni mobili e immobili, la cui complessa eterogeneità materiale e semantica prevede a monte una approfondita conoscenza dei materiali e delle tecniche artistiche, nonché, dei principi e delle tecniche di prevenzione, di manutenzione e restauro.

La ricerca è indirizzata a quattro oggetti di studio e d'intervento:

1. le superfici architettoniche (compresi mosaici e pavimenti);
2. i manufatti realizzati su supporto cartaceo;
3. i reperti recuperati in mare (anche detti "underwater");
4. gli apparati murari degli edifici siti in aree a rischio sismico.

1.1 Elementi presi in considerazione per l'aggiornamento

Data la complessità e l'eterogeneità delle tematiche affrontate nella traiettoria, il cui sviluppo ai fini della produzione di nuove conoscenze e protocolli di azione necessita di un approccio multi e transdisciplinare, l'aggiornamento ha tenuto conto non solo degli studi più recenti inerenti i settori della conservazione e del restauro del Patrimonio ma, anche, quelli maturati in altri ambiti del sapere, con particolare riguardo a ingegneria, biologia, nanoscienze e nanotecnologie.

Gli elementi presi in considerazione per l'aggiornamento riflettono gli sviluppi maturati dalla ricerca nell'ultimo anno, rispetto alle tematiche affrontate nella traiettoria come precedentemente descritte. Gli scopi della traiettoria, oltre a convergere con gli obiettivi di Horizon Europe, PNRR e Green Deal, sono attualmente al centro del dibattito sulla conservazione del Patrimonio, come testimonia il numero di interventi ad essi dedicati, fra i quali recentissimi si ricordano: il convegno ICOM Working toward a sustainable past (2023), la XXIII Imeko International Conference On Metrology for Archaeology and Cultural Heritage (2023), il XVII Convegno Biodétérioration des Marériaux (2023); la XXII Conferenza "Biodeterioration of Stone Monuments", il Climate Change and Cultural Heritage IFAU23 - IV International Forum for Architecture and Urbanism; il simposio Rinforzo strutturale e consolidamento di elementi strutturali con sistemi certificati, innovativi e sostenibili (2023); i due convegni annuali (2022-2021) del Distretto Tecnologico per i Beni e le attività Culturali della Regione Lazio (DTC Lazio); il simposio tenutosi a Roma alla fine di novembre 2023 organizzato dalla fondazione CHANGES in collaborazione con DTC Lazio, dal titolo "Tecnologie e Patrimonio Culturale. Nuove competenze e professioni".

Analisi SWOT (<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>)	
Punti di forza	Punti di debolezza
<ul style="list-style-type: none">- Elevata conoscenza delle metodologie e delle tecnologie di conservazione dei beni culturali;- Sviluppo di materiali innovativi e congrui rispetto alle esigenze ambientali;- Internazionalizzazione della Ricerca;- Dotazione di strumentalizzazione di	<ul style="list-style-type: none">- Ricerche non sempre finalizzate;- Scarso coordinamento e collaborazione tra centri di ricerche;- Limitate applicazioni a casi reali;- Limitato trasferimento tecnologico;- Scarse risorse finanziarie;- Difficoltà di brevettazione.

avanguardia; - Formazione accademica ben strutturata; - Interdisciplinarietà della ricerca.	
Opportunità	Minacce
- Presenza di numerose aziende potenzialmente interessate allo sviluppo di nuovi materiali e nuove tecnologie; - Richiesta d'innovazione; - Attenzione verso i temi della conservazione; - Comunicazione delle ricerche e del loro stato attraverso i mass media.	- Mancanza di protocolli per la manutenzione programmata; - Limitata comunicazione con gli <i>stakeholder</i> ; - Crisi in numerose attività dedicate al restauro; - Investimenti insufficienti; - Mancanza di obiettivi comuni realizzabili attraverso finanziamenti condivisi; - Eccessiva frammentazione delle ricerche; - Carenza di stakeholders industriali.

2. Definizione delle sotto-traiettorie

Data l'ampia articolazione delle tematiche incluse nella traiettoria 4, si ritiene utile suddividerle in sotto-traiettorie che raccolgono ambiti di ricerca e sviluppo specifici per tipologia di supporto e di intervento, come riportato nella sottostante tabella:

SOTTO-TRAIETTORIA	DEFINIZIONE
4.1 Tecnologie e nuovi materiali per la conservazione di superfici architettoniche, incluse anche le opere musive e delle pavimentazioni	Vengono analizzate tecnologie per la conservazione delle superfici architettoniche, che agiscono sia come elementi decorativi, sia come interfaccia protettiva verso l'esterno. Le azioni incluse nella sotto-traiettorie comprendono interventi diretti (es. miglioramento delle condizioni ambientali) e indiretti (es. mirati al contrasto del degrado).
4.2 Tecnologie e nuovi materiali per la conservazione degli apparati murari, inclusi materiali per interventi in aree sismiche (consolidamento e risanamento muratore, retrofit, FRCM).	Questa sotto-traiettorie approfondisce i temi legati all'analisi degli edifici storici, concentrandosi su strutture e materiali di costruzione. L'obiettivo è studiare i nuovi sistemi di rinforzo, come i Fiber Reinforced Cementitious Matrices (FRCM), per contrastare il degrado causato dalle oscillazioni del suolo, mantenendo compatibilità e sostenibilità ambientale. L'attenzione è anche rivolta alle fibre vegetali nei composti cementizi e all'uso di software per valutare la vulnerabilità sismica e ottimizzare le operazioni di consolidamento.
4.3 Tecnologie e nuovi materiali per la conservazione di beni mobili: pulitura, consolidamento, protezione (deacidification, cleaning, protection, underwater)	Metodologie e materiali per proteggere i beni mobili su vari supporti. Interventi di pulitura e protezione per manufatti su carta e su quelli sommersi, inclusi manufatti lignei, con particolare attenzione al post-rinvenimento. Vengono esplorati approcci come l'elettroassorbimento deionizzante e l'uso di nanocarbonati di calcio. Nella conservazione di reperti sommersi, sono stati studiati rivestimenti polimerici idrofobici e protocolli di monitoraggio con sensori ambientali e videocamere per valutare lo stato di conservazione.

Le soluzioni individuate in ciascuna sotto-traiettorie sono mirate a:

- valutazioni preventive dei rischi e dei danni;
- interventi di mitigamento e adattamento ai cambiamenti globali;
- sviluppo di nuove tecniche e materiali per la pulitura, il consolidamento e la protezione delle

superfici architettoniche.

2.1 Sotto-traiettoria 4.1: TECNOLOGIE E NUOVI MATERIALI PER LA CONSERVAZIONE DI SUPERFICI ARCHITETTONICHE INCLUSE ANCHE LE OPERE MUSIVE E DELLE PAVIMENTAZIONI (PULITURA, CONSOLIDAMENTO, PROTEZIONE)

Le tecnologie comprese in questa sotto-traiettoria considerano la duplice natura della superficie architettonica: apparato decorativo di completamento al sistema architettonico e interfaccia fra questo e l'ambiente esterno, nei confronti del quale assume un ruolo difensivo rispetto agli agenti e ai fattori di degrado.

La progettazione delle tecnologie destinate alla conservazione e al restauro di questi materiali deve tenere conto non solo degli aspetti appena menzionati ma, soprattutto, dell'eterogeneità degli interventi conservativi, suddivisibili in tipologie comprensive di:

- azioni indirette: indirizzate a migliorare le condizioni termo-igrometriche dell'ambiente e a limitare fattori esterni di deterioramento;
- azioni dirette: orientate ad arrestare il degrado in atto, ristabilire la resistenza meccanica delle facciate, risarcire le lacune e prevenire i danni futuri.

Pertanto, la sotto-traiettoria 4.1 si concentra sullo sviluppo di azioni finalizzate all'implementazione e l'innovazione di tecniche, tecnologie e materiali per la pulitura, il consolidamento, la protezione e la conservazione preventiva dei manufatti, suddivise e riassunte nei sottostanti obiettivi:

1. pulitura, consolidamento e protezione dei materiali lapidei;
2. biocidi e materiale lapideo;
3. conservazione preventiva.

Lo stato dell'arte è ora integrato dai recenti sviluppi sulla diffusione e sull'utilizzo di nanoformulazioni: rivestimenti costituiti da nanocompositi di silice e biossido di titanio hanno infatti dimostrato grande efficacia per la pulitura di superfici colonizzate da agenti biologici, contribuendo inoltre alla prevenzione del deterioramento attraverso un considerevole incremento del carattere idrofobico, oltre che della resistenza termica e meccanica dei materiali (Irizar Merino *et al.*, 2023). Di tale approccio, realizzato attraverso formulazioni di metil-trimetossisilano in silice, si sono apprezzate in special modo le proprietà anti-deterioramento da agenti atmosferici e inquinamento (Zhang *et al.*, 2023).

Di notevole rilievo risulta anche l'utilizzo di nanosilicati, dato il ruolo da loro svolto nella promozione dell'adesione di altre sostanze, come nel caso di liquidi ionici surfattanti ad azione biocida (Luci *et al.*, 2023), o di stabilizzazione a contatto con l'acqua, per alcune formulazioni di copolimeri di acrilato (He *et al.*, 2023).

Le ricerche sull'estrazione e l'isolamento di oli essenziali e bioacidi da organismi vegetali, individuandone la tossicità per i microrganismi biodeteriogeni, sono state messe alla prova attraverso lo sviluppo di protocolli pilota ex situ (Isola *et al.*, 2023; Cennamo *et al.*, 2023): oli essenziali di origano, garofano, timo, oltre che il timo stesso e l'acido usmico di derivazione lichenica si sono dimostrati efficaci in tal senso. Inoltre, è stata effettuata un'analisi comparativa dei loro effetti su una varietà di substrati lapidei (Gabriele *et al.*, 2023).

Infine, si segnalano gli studi realizzati sull'utilizzo di AO (ossigeno atomico) per le operazioni di pulitura delle superfici che presentano depositi CBC (a base di carbonio) (Yang *et al.*, 2023)

Descrizione degli obiettivi della sotto-traiettoria 4.1

1. PULITURA, CONSOLIDAMENTO E PROTEZIONE DEI MATERIALI LAPIDEI

Per raggiungere tali obiettivi è necessario:

- a) lo sviluppo e l'ottimizzazione delle procedure di produzione di materiali e nanomateriali eco-compatibili, in grado di fornire:
 - proprietà multifunzionali (idrorepellenza e proprietà barriera, traspirabilità, elevata adesione a substrati diversi, proprietà di autoriparazione come consolidanti, trasparenza e proprietà ottiche, proprietà anti-imbrattamento, self-cleaning);
 - capacità meccaniche (resistenza meccanica, resistenza superficiale al graffito/abrasione);
 - durabilità agli agenti ambientali esterni (come, ad esempio, fotocatalisi e ossidazione di inquinanti gassosi e particolati) in condizione di cambiamenti climatici, innalzamento delle temperature e delle precipitazioni;
- b) l'identificazione di nuovi sistemi di pulitura, riciclabili a basso impatto ambientale ed economici, utili per la pulitura delle superfici;
- c) la sistematizzazione di protocolli efficaci e speditivi per il monitoraggio del comportamento dei prodotti in situ e dello stato di conservazione delle superfici.

2. BIOCIDI E MATERIALE LAPIDEO

L'obiettivo prevede l'implementazione di tecnologie di protezione delle superfici, attraverso l'utilizzo di biocidi a rilascio lento e controllato, miscelabili con sistemi compositi (malte e intonaci) applicabili in aree soggette a biodeterioramento, come le aree archeologiche, gli ambienti esterni e tutto gli spazi esposti ad umidità non controllata, quali ipogei e semi-ipogei.

3. CONSERVAZIONE PREVENTIVA

L'ultimo obiettivo della sotto-traiettoria 4.1 richiede:

- a) creazione di protocolli di monitoraggio sostenibili per gli enti preposti alla tutela, gli stakeholders, i progettisti e i restauratori;
- b) ottimizzazione e miglioramento dei test per la valutazione delle prestazioni, della durabilità e della sicurezza dei prodotti per i manufatti e per gli operatori, in laboratorio e in situ;
- c) sviluppo di protocolli di misura sostenibili per gli enti preposti alla tutela, gli stakeholder, i progettisti e i restauratori.

TECNOLOGIE	
Nanocomposti per la Protezione ed il Consolidamento di Superfici Lapidee	<ul style="list-style-type: none"> - Nanocompositi ibridi biogeni come materiali multifunzionali per la conservazione dei lapidei; - Proprietà in grado di incrementare la resistenza meccanica, termica ed il carattere idrofobico delle superfici; - Ecosostenibilità e praticità d'uso.
Liquidi Ionici Surfattanti in Formulazione con Nanosilicati	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminazione del biodeterioramento attraverso le attività di liquidi tensioattivi; - Capacità adesive delle sostanze potenziate grazie allo sviluppo di nanoformulazioni con silicati.
Oli Essenziali e Bioacidi per la Mitigazione del Biodeterioramento	<ul style="list-style-type: none"> - Formulazioni eterogenee di sostanze biocide estratte da una varietà di organismi vegetali facilmente reperibili (biodisponibilità); - Tipicamente oli essenziali, bioacidi e idrogel di facile applicazione, selezionabili in funzione della natura del substrato oggetto di conservazione e della tipologia di degrado.
Ossigeno Atomico	Metodica ecosostenibile che consente di sfruttare ossigeno in forma atomica, normalmente presente in atmosfera sopra gli 80 km, per una pulizia che non preveda uso di solventi, applicazioni spray o qualsiasi altra forma di contatto diretto col substrato.
PROGETTI AFFINI ALLA SOTTO-TRAIETTORIA	
Fra i progetti attualmente in fase di svolgimento si segnalano:	

- [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/101061336](https://cordis.europa.eu/project/id/101061336): (MOXY) Green atmospheric plasma-generated monoatomic oxygen technology for contactless atomic scale cleaning of works of art;
- [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/101060768](https://cordis.europa.eu/project/id/101060768): (GoGreen) Green Strategies to Conserve the Past and Preserve the Future of Cultural Heritage;
- [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/101132442](https://cordis.europa.eu/project/id/101132442): (ChemiNova) Novel technologies for on-site and remote collaborative enriched monitoring to detect structural and chemical damages in cultural heritage assets;

Mentre, fra le call recentemente chiuse, vedasi:

- [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/700395](https://cordis.europa.eu/project/id/700395): (HERACLES) HEritage Resilience Against CLimate Events on Site;
- [HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/ARTICLE/ID/151241-ARTWORKS-CONSERVED-WITH-NANOTECHNOLOGY](https://cordis.europa.eu/article/id/151241-artworks-conserved-with-nanotechnology): Artworks conserved with nanotechnology;
- [HTTPS://WWW.HERITAGERESEARHC-HUB.EU/PROJECT/NANOFORART/](https://www.heritageresearch-hub.eu/project/nanoforart/): Nano-materials for the conservation and preservation of movable and immovable artworks;

RISULTATI ATTESI DALLA SOTTO-TRAIETTORIA

- Upgrade della ricerca multidisciplinare nel settore della conservazione e divulgazione scientifica;
- Miglioramento delle condizioni di vita e dei beni culturali, nella prospettiva della loro trasmissione al futuro;
- Sviluppo di tecnologie innovative per la manutenzione e la conservazione preventiva delle superfici architettoniche;
- Costruzione di reti di partenariato nazionali e internazionali;
- Passaggio alla conservazione programmata;
- Maggiore efficienza dei processi di tutela e valorizzazione;
- Migliore pianificazione degli interventi di conservazione;
- Sviluppo e sperimentazione di tecnologia green per il consolidamento di metodologie d'intervento in linea con le odierne politiche ambientali;
- Trasferimento tecnologico ad aziende del settore a basso impatto tecnologico.

2.2 Sotto-traiettorie 4.2: *TECNOLOGIE E NUOVI MATERIALI PER LA CONSERVAZIONE DEGLI APPARATI MURARI (INCLUSI MATERIALI PER INTERVENTI IN AREE SISMICHE)*

Questa sotto-traiettorie è dedicata all'approfondimento del comportamento degli edifici d'interesse storico, storico-artistico e archeologico, delle loro strutture e dei materiali di costruzione, e rappresenta un'integrazione importante agli argomenti affrontati nella successiva traiettorie, dedicata ai sistemi per il monitoraggio e la mitigazione dei rischi prodotti dai fattori di deterioramento antropico e ambientale.

In special modo, oggetto d'indagine di questa sotto-traiettorie sono i meccanismi di innesco dei processi di degrado attivati dalle oscillazioni del suolo, per i quali si studiano nuovi sistemi di rinforzo strutturale, basati sull'utilizzo di composti a matrice inorganica (leganti idraulici) in alternativa a quelle organiche (resine polimeriche), più performanti ed efficaci ma, soprattutto, compatibili con i materiali originali, sostenibili sul piano ambientale e economico. Dagli anni '90 ad oggi, infatti, si è passati dai materiali compositi a base polimerica fibrorinforzati (FRP), ai materiali compositi a matrice inorganica, i cosiddetti Fiber Reinforced Cementitious Matrices (FRCM), Inorganic Matrix-Grid composites (IMG), Textile Reinforced Mortars (TRM).

Tuttavia, nonostante questi importanti progressi, questo tema rimane ancora scientificamente d'interesse, in special modo per la varietà di sistemi realizzabili impiegando reti e matrici inorganiche differenti, pertanto, continua a rappresentare una sfida per la ricerca, supportata dalla maggiore attenzione alla sostenibilità ambientale e dall'avanzamento tecnologico nella produzione e trasformazione delle matrici inorganiche.

La sotto-traiettorie si focalizza dunque sullo studio di nuove tecnologie e materiali per il rinforzo e la conservazione delle strutture murarie degli edifici, in special modo quelli siti in aree a rischio sismico, fra i

fattori ambientali il principale responsabile della vulnerabilità strutturale del nostro Patrimonio.

L'obiettivo che si prova a raggiungere è di rendere più sicure le opere in muratura, sfruttando nuove tecnologie e materiali di rinforzo che non snaturino il carattere storico degli edifici, inoltre, di valutare l'efficacia delle tecniche attualmente disponibili, oltre che evidenziare la necessità di sviluppare soluzioni innovative di consolidamento, le quali:

- garantiscano la compatibilità con i materiali originali;
- preservino la faccia-vista delle facciate;
- mantengano la funzionalità e l'utilizzo da parte degli occupanti del fabbricato (anche durante gli interventi di consolidamento);
- salvaguardino eventuali decorazioni presenti sulla parete (in collegamento con la sotto-traiettorie 4.1);
- combinino miglioramento sismico ed energetico.

Negli ultimi anni speciale attenzione è stata rivolta alle ricerche condotte sulle fibre vegetali utilizzate nei composti cementizi, sia per la sostenibilità ambientale sia per le potenzialità che queste offrono, quali la riduzione della densità, della frammentazione e della propagazione delle fessure nel calcestruzzo. Al riguardo, si segnalano le ricerche sulle fibre di cocco (Es. Do Nascimento, et al., 2013) e, ancora sugli NF (fibre di pigna) le cui proprietà (compatibilità con le malte geopolimeriche e resistenza all'umidità) sono state recentemente confrontate con le GF (fibre di vetro), anch'esse oggetto di particolare attenzione da parte della ricerca (Es. Haily, et al., 2023).

Recente e dedicato espressamente alla produzione di nuove matrici per il rinforzo degli edifici storici è inoltre lo studio sulle malte rinforzate con fibre di alcol polivinilico (PVA), di cui è stata apprezzata la compatibilità chimica con le murature (Mercuri et al., 2023).

Di interesse risultano inoltre gli esiti dell'utilizzo delle tecniche di RETROFIT negli edifici storici (Es. Mathew, et al., 2023; Wise, et al., 2023); oltre alle possibili riduzioni di carbonio consentite dall'applicazione di tale procedura sono da tenere in considerazione anche le recenti analisi sui costi-benefici in termini energetici ed economici (Khodabakhshian, Re Cecconi, 2023).

Tra le nuove tecnologie applicate ai contesti della prevenzione, valutazione e mitigazione del rischio sismico si segnalano l'uso di alcuni software (es. Tremuri, Lagomarsino et al., 2023) che hanno permesso di svolgere analisi comparative per la valutazione della vulnerabilità strutturale di edifici d'interesse storico, sviluppando curve di rischio in funzione dello scenario sismico potenziale (Onescu et al., 2023); è stato inoltre possibile, attraverso analisi di regressione logistica, associare alla valutazione della fragilità dei manufatti sottoposti alle oscillazioni, l'efficacia degli elementi di fissaggio da adoperare per la mitigazione del danno stesso (Yang et al., 2023).

L'approfondimento sull'utilizzo di FMCR nelle operazioni di rinforzo strutturale è partito da una riflessione sulla particolare distribuzione degli edifici e dei siti archeologici sul territorio italiano e, pertanto, ha analizzato i risultati dei recenti test condotti su campioni del patrimonio locati in aree urbane interessate dal traffico e dal passaggio delle metropolitane (es. Karanikoloudis, 2023; S. Santini et al., 2023), con l'obiettivo di implementare l'utilizzo di tale metodica nelle operazioni di consolidamento.

Descrizione degli obiettivi della sotto-traiettorie 4.2

1. CONSOLIDAMENTO E RISANAMENTO DELLE MURATURE

Tale obiettivo può essere conseguito attraverso:

- a) lo sviluppo di materiali (sia a matrice organica sia inorganica) e tecniche di intervento compatibili con il supporto, durevoli e sostenibili in termini economici per la conservazione, il risanamento e l'intervento di ripristino delle strutture in muratura affette da umidità di risalita (non solo nelle aree ad elevato rischio sismico);
- b) l'utilizzo di RETROFIT e FRM;
- c) l'identificazione di nuovi materiali per il rinforzo strutturale, in grado di garantire significative caratteristiche di efficienza del legame chimico e meccanico con la muratura e a basso

impatto ambientale (secondo approccio LCA).

TECNOLOGIE	
Fiber Reinforced Cementitious Matrices (FRCM – IMG TRM).	Insieme di reti realizzate in diverse fibre (TRC -Textile Reinforced Concrete; TRM - Textile Reinforced Mortars; FRM - Fabric Reinforced Mortar; IMG Inorganic Matrix-Grid Composites), miscelate con matrici inorganiche a base di calce o malta cementizia.
Tecnologia ENEA per Edifici a “Danno Zero” Sistema SIP	Basamento Antisismico per Strutture Edili Inventori: Battilocchio Aldo- Famoos, Paolini Giovanni- Clemente Paolo (ENEA) Titolari: ENEA - Tekva srl. Piattaforma in cemento armato, alleggerita mediante tubi in vetroresina, che consente di abbattere fino all’80% gli effetti delle scosse sismiche sugli edifici, con tempi di costruzione ridotti e a costi competitivi, rispettando l’assetto urbanistico e architettonico dei centri urbani preesistenti.
Innovativo Sistema ENEA di Isolamento Sismico per Edifici Esistenti Sistema SISEB	Struttura di Isolamento Sismico per Edifici Esistenti Inventori: Clemente Paolo (ENEA) - De Stefano Alessandro - Barla Giovanni. Si tratta di una struttura di isolamento sismico, ovvero, una piattaforma isolante sistemata sotto le fondazioni, senza alcun intervento sulle costruzioni sovrastanti.
Materiali Compositi TMR per il Rinforzo Antisismico della Muratura Storica (in fase di sperimentazione)	Sperimentazioni di tessuti ad altre prestazioni meccaniche applicate attraverso matrici inorganiche (Textile Reinforced Mortar- TMR) per il rinforzo antisismico della muratura storica.
Ristilatura Armata Attiva della Muratura Storica a Facciavista (in fase di sperimentazione)	La ristilatura armata attiva dei giunti di malta mediante cavi di acciaio è un sistema di rinforzo antisismico della muratura storica che consente di “nascondere” l’intervento in modo da non mutarne l’aspetto esterno a facciavista delle strutture storiche.
Elaborazioni Video Derivate dal Moto Magnificato (MM) (in fase di sperimentazione)	Le elaborazioni di video digitali mutuata dalla tecnica del Moto Magnificato (MM) sono elaborazioni in grado di amplificare i piccoli movimenti presenti negli oggetti ripresi nel videodigitale, rendendoli visibili ad occhio nudo, ed estraendo segnali passibili di calcolo quantitativo, tipicamente nel dominio della frequenza.
Sistema Restart per la Ricomposizione di Precisione di Statue Lapidarie Frammentarie (sperimentazione e validazione conclusa nel 2020, tecnologia già matura e utilizzata)	Il metodo di ricomposizione di precisione di statue lapidarie frammentarie messo a punto ed ideato dall’Arch. P. M. Nardelli per Ma.Co.Rè. s.r.l. nel progetto RestArt, si basa sulla realizzazione di un innovativo sistema mecatronico a controllo numerico guidato secondo una procedura sviluppata nell’ambito del progetto con l’utilizzo di appositi software e sulla base di scansioni laser 3D dei frammenti da ricomporre.
PROGETTI AFFINI ALLA SOTTO-TRAIETTORIA	
<p>- HORIZON-CL5-2024-D4-02-01: Industrialisation of sustainable and circular deep renovation workflows (Built4People Partnership);</p> <p>Mentre, recentemente chiuse:</p> <p>- SMP-COSME-2021-CLUSTER-01: INGENIOUS (Building resilience and accelerating transition to green and digital economy in Energy Intensive Industries);</p> <p>- HORIZON-CL2-2022-HERITAGE-01-07: Protection of artefacts and cultural goods from anthropogenic threats;</p>	

- [HORIZON-CL2-2022-HERITAGE-01-08](#): Effects of climate change and natural hazards on cultural heritage and remediation.
- HORIZON-CL2-2023-HERITAGE-01-01: Advanced technologies for remote monitoring of heritage monuments and artefacts
- [HTTPS://DTCLAZIO.IT/ATLAS](https://dtclazio.it/atlas): ATLAS (Advanced Technologies for Cultural Heritage Safeguard);
- [HORIZON-CL5-2022-D4-02-03](#) Sustainable and resource-efficient solutions for an open, accessible, inclusive, resilient and low-emission cultural heritage: prevention, monitoring, management, maintenance, and renovation (Built4People).

RISULTATI ATTESI DALLA SOTTO-TRAIETTORIA

- Lo sviluppo e l'applicazione di nuovi materiali più performanti e più sostenibili.
- L'avanzamento di tecniche di risanamento e consolidamento delle murature di rilevanza storica.
- La costruzione di reti di partenariato nazionali e internazionali.

2.3 Sotto-traiettoria 4.3: TECNOLOGIE E NUOVI MATERIALI PER LA CONSERVAZIONE DI BENI MOBILI (PULITURA, CONSOLIDAMENTO, PROTEZIONE)

La sotto-traiettoria 4.3 è dedicata allo sviluppo di metodologie, tecniche e materiali necessari per la protezione dei beni mobili realizzati su supporti in legno, ceramica, carta, tela e metalli. In special modo la sotto traiettoria mira ad approfondire gli interventi di pulitura e protezione dei beni realizzati su supporto cartaceo, ligneo e, anche, gli “underwater” il cui studio allo stato attuale delle ricerche rivela diverse lacune conoscitive, soprattutto sulle fasi di trattamento e conservazione dei manufatti post rinvenimento.

In merito alla conservazione dei supporti cartacei, una risposta all’annoso problema dell’acidificazione della carta è costituita dall’elettroassorbimento deionizzante attraverso elettrodi costituiti da piastre di grafite disposte ai lati del manufatto, una pratica che si è dimostrata in grado di promuovere la de-acidificazione della matrice cartacea (Fan *et al.*, 2023).

Gli studi sui sistemi ibridi di nanocarbonati di calcio e idrossipropilcellulosa hanno fatto registrare una visibile riduzione del pH e un incremento della resistenza alla trazione della carta trattata, preservandone oltretutto la caratteristica bianchezza (Yang *et al.*, 2023). Una simile riduzione del pH associato ad un incremento della resistenza meccanica, oltre che dell’idrofobia, si è inoltre attestato nel caso di applicazioni di spray con formulazioni di nano-ossidi alcalini (Zhao *et al.*, 2023).

Per quanto riguarda la conservazione dei reperti sommersi (*underwater*), si segnalano gli studi finalizzati a rendere più economici i trattamenti e il monitoraggio. Nel primo caso, sono particolarmente interessanti le ricerche sui rivestimenti a base di polimeri di resine epossidiche, aventi accentuate proprietà idrofobiche che hanno contribuito a ridurre drasticamente la colonizzazione da parte di microrganismi, senza alterare le caratteristiche cromatiche originali dei manufatti (Donato *et al.*, 2023).

La sotto-traiettoria comprende inoltre i protocolli sviluppati per la messa a punto di controlli tentacolari e poliedrici, adoperando sensori per il monitoraggio continuo dei parametri ambientali d’interesse (temperatura, pH, ossigeno, etc.), e un apparato di videocamere e router per la trasmissione di immagini che permettano un check continuativo dello stato di conservazione (Lupia *et al.*, 2023).

Descrizione degli obiettivi della sotto-traiettoria 4.3

1. DEACIDIFICATION, CLEANING, REINFORCEMENT, PROTECTION

L’obiettivo prevede le seguenti azioni:

- a) sviluppo di materiali avanzati, ibridi, compositi e polifunzionali basati sulla nanostrutturazione, con caratteristiche eco-compatibili e di sostenibilità ambientale, in grado di migliorare le proprietà chimico-fisiche e meccaniche di materiali degradati in maniera durevole, assicurando elevata compatibilità tra i prodotti di restauro applicati e l’opera;

- b) messa a punto di protocolli d'intervento ad hoc che, ispirati ai principi sopra esposti, siano ottimizzati sulle caratteristiche materiali specifiche dei beni (pittura su tela e tavola, pergamena, carta, cuoio, ceramiche, metallo, tessuti, fotografia, pellicole, avorio, papiro, legno, plastica, reperti archeologici di varia natura, materiale organico in genere).

2. CONSERVAZIONE PREVENTIVA

Per raggiungere questo obiettivo è necessario:

- a) analizzare gli effetti diretti e indiretti dell'azione ambientale e antropica sulla conservazione delle opere prese in considerazione dalla sotto-traiettoria, ai fini di approntare protocolli di monitoraggio sostenibili per gli enti preposti alla tutela;
- b) sviluppare soluzioni tecnologiche a basso costo, al fine di rendere i protocolli di monitoraggio economicamente sostenibili.

TECNOLOGIE	DESCRIZIONE
Deacidificazione Manufatti Cartacei	<ul style="list-style-type: none"> - Riduzione del pH ottenuta grazie all'applicazione di nanocarbonati di calcio; - Resistenza alla trazione potenziata in seguito all'applicazione di idrossipropilcellulosa; - Formulazioni ibride con l'aggiunta di etanolo come agente dispensante.
Deacidificazione per Elettroassorbimento	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema simile ad una pressa per la stampa, con due elettrodi di grafite piatti come superfici di compressione; - Sottrazione di ioni dal materiale, garantendo una deacidificazione efficace e completa.
Rivestimenti Idrofobi Anti-degrado	<ul style="list-style-type: none"> - Carattere idrofobico delle superfici incrementato grazie a formulazioni di resine epossidiche; - Eliminazione del biodeterioramento e funzione repellente.
Sistemi di Monitoraggio e Trasmissione Dati	<ul style="list-style-type: none"> - Misurazione dei parametri ambientali e della computazione di immagini digitali; - Elaborazione e trasmissione di immagini in tempo reale per il controllo costante dello stato di conservazione e di degrado dei manufatti; - Applicabile ad una larga varietà di contesti.
PROGETTI CONNESSI AI TEMI DELLA SOTTO-TRAIETTORIA	
<p>Si segnalano le seguenti call:</p> <ul style="list-style-type: none"> - HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/101095253: Technologies and methods for improved resilience and sustainable, preservation of underwater and coastal cultural heritage to cope with climate change, natural hazards and environmental pollution; - HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/101060941: GREen ENdeavor in Art ResToration - HTTPS://CORDIS.EUROPA.EU/PROJECT/ID/101060768: Green Strategies to Conserve the Past and Preserve the Future of Cultural Heritage. <p>Mentre, recentemente chiuse:</p> <ul style="list-style-type: none"> - HORIZON-CL2-2022-HERITAGE-01-08: Effects of climate change and natural hazards on cultural heritage and remediation; 	
RISULTATI AFFINI ALLA SOTTO-TRAIETTORIA	
<ul style="list-style-type: none"> - conservazione sostenibile; - innovative strategie di conservazione chimico-fisiche, morfologiche e strutturali; - progettazione e validazione di materiali innovativi a bassa tossicità. 	

2.4 Congruenze e sinergie con Horizon Europe, PNR, PNRR

In merito ai temi presi in considerazione dalla traiettoria, rispetto allo stato attuale delle ricerche, dei progetti e delle politiche d'intervento nazionali ed internazionali, si segnala la convergenza fra gli intenti dichiarati e gli obiettivi del:

- Horizon Cluster 2 “Cultural and creative industries for a sustainable climate transition” (consapevolezza delle opportunità offerte dalla transizione climatica sostenibile; sviluppo di ricerche e approcci basati su nuovi modelli di business, per facilitare le industrie nella transizione climatica sostenibile; sviluppo di protocolli atti a preparare le industrie creative alla transizione climatica, in linea con gli obiettivi del 2030 stabiliti Green Deal europeo).
- Horizon Cluster 5 “Climate, Energy and Mobility” (sviluppo di soluzioni per le transizioni verdi e digitali e relative trasformazioni dell'economia, dell'industria e della società);
- PNRR, Missione 1 “Digitalizzazione, Innovazione, Competitività, Cultura” (in special modo, MIC3 “Industria culturale e creativa 4.0”, investimenti 1.1 “strategie e piattaforme digitali per il patrimonio culturale”, 2.2 “Tutela e valorizzazione dell’architettura e del paesaggio rurale”, 2.4 “Sicurezza sismica nei luoghi di culto, restauro del patrimonio FEC e siti di ricovero per le opere d’arte (Recovery Art)”, 3.3 “Capacity building per gli operatori della cultura per gestire la transizione digitale e verde”);
- PNRR Missione 4 “Istruzione e Ricerca” (in special modo, M4C2.1 – Rafforzamento della ricerca e diffusione di modelli innovativi per la ricerca di base e applicata condotta in sinergia tra Università e imprese; M4C2.2 – Sostegno ai processi di innovazione e trasferimento tecnologico; M4C2.3 – Potenziamento delle condizioni di supporto alla ricerca e all’innovazione);
- Green Deal dell’UE;
- Horizon Cluster 2, “Culture, Creativity and Inclusive Society” agenda dei lavori 2023/2024

PRINCIPALI STAKEHOLDER	
Università, EPR, IR, Distretti	<ul style="list-style-type: none"> - Università degli Studi di Torino; - Università degli Studi “Ca' Foscari” di Venezia; - Centro per la conservazione ed il restauro dei Beni Culturali “La Venaria Reale”; - Politecnico di Milano, Università di Firenze, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Università di Roma La Sapienza, - Politecnico di Torino, Università di Bologna, Università del Salento.
Imprese	<ul style="list-style-type: none"> - Cultura e Innovazione S.c.ar.l.; - STRESS S.c.ar.l.
Altri portatori di interesse	<ul style="list-style-type: none"> - MUR; - ENEA; - CNR. - Commissione Europea; - National Natural Science Foundation of China; - Ministerio de la Economía y Competitividad spagnolo; - Regione Campania Dipartimento Protezione Civile.

*La tabella sintetizza gli stakeholder comuni a tutte le sotto-traiettorie

3. Roadmapping

Alla luce di quanto emerso dallo stato delle conoscenze e da studi specifici (si veda ad esempio il lavoro svolto nell’ambito del cluster europeo ECHOES Enabling Cultural Heritage Oriented European Strategies; <http://www.ehc.eu>), risulta evidente che le linee di ricerca incluse nella traiettoria 4

possono costituire un nucleo importante di sviluppo e di trasferimento tecnologico a livello nazionale e internazionale.

Sulla base di quanto rilevato nell'ambito delle tematiche individuate nella traiettoria 4, sono state identificate linee di sviluppo in parte riferibili alla precedente *roadmap*, per la necessità di testare *in situ* le tecnologie sviluppate in laboratorio e per il tempo necessario ad impiantare un'accurata programmazione che, nella maggior parte dei casi, coinvolge anche gli enti preposti alla salvaguardia del patrimonio.

Le linee di ricerca che ogni sotto-traiettoria individua come obiettivi per il prossimo triennio, incluse attività di formazione e di divulgazione ritenute indispensabili volani per la ricerca e per incrementare la ricettività dei prodotti della ricerca da parte delle aziende e dei professionisti, sono dunque:

- Incentivare la conservazione programmata; Maggiore efficienza dei processi di tutela e valorizzazione; Sbloccare il pieno potenziale delle scienze del patrimonio per interventi più efficaci/durevoli e rispettosi Sperimentazione di nuovi metodi più efficienti e rispettosi dell'ambiente (tecnologie green); Trasferimento tecnologico ad aziende del settore che al momento presentano un basso contenuto tecnologico;
- Sbloccare il pieno potenziale delle scienze del patrimonio per interventi più efficaci e rispettosi; disponibilità aperta delle conoscenze più avanzate; incentivare la multidisciplinarietà e transdisciplinarietà delle ricerche;
- Sviluppare soluzioni per la protezione con il diretto coinvolgimento delle imprese dedicate al settore; Creazione di database; Condivisione di protocolli; Coinvolgimento dei cittadini nel monitoraggio del patrimonio; Formazione specifica anche in scuole di diversi ordini e grado Incentivare la formazione dei professionisti attraverso corsi on line.

Riferimenti bibliografici adoperati e citati per l'aggiornamento

AA.VV., *Proceedings of the 2nd Conference*, Atti del Convegno Annuale (Roma 4 novembre 2021), cura di Camilla Arcangioli, Maria Sabrina Sarto, L'Erma di Bretschneider 2022.

AA.VV., *Digital transformation and green deal in Cultural Heritage*, Atti del Convegno Annuale (Roma 23 settembre 2022), Armando Editore 2022.

E. M. Haily, N. Zari, R. Bouhfid, A. Qaiss, *Natural fibers as an alternative to synthetic fibers in the reinforcement of phosphate sludge-based geopolymer mortar*, Journal of Building Engineering (67), may 2023.

Al-Saidy, A., El-Gamal, S. & Abu Sohail, K. Strengthening of Reinforced Concrete (RC) Beams using Textile Reinforced Mortars (TRMs), Int J Civ Eng (21), 2023–2035 (2023).

F. Wise, A. Moncaster, D. Jones , *The Routledge Handbook of Embodied Carbon in the Built Environment*, Routledge 2023.

A. Khodabakhshian, F. Re Cecconi, *Data-Driven Decision-Making Framework for Cost-Efficient Energy Retrofit of Italian Residential Building Stock*, in Intelligent Systems and Applications., a cura di K. Arai, vol 822, Springer 2023.

D. Mathew, R. O'Hegarty, Oliver Kinnane, *Historic buildings to Positive Energy Buildings: a trilemma between energy efficiency, lifecycle carbon and architecture conservation*, in Journal of Physics: Conference Series, n. Ser. 2654.

M. R. Pereira Do Nascimento, C. Souza Barboza, A. R. Omido, *Behavior of Cement Mortar with the Addition of Coconut Fibers*, *M, Revista de gestão social e ambiental*, 17 (10), 2023.

G. Karanikoloudis, *Experimental methods for investigating the effects of soil settlements and vibrations in cultural heritage buildings, induced by underground structure*, PHD thesis 2023.

S. Santini, V. Sabbatini, C. Sebastiani, C. Baggio, *Integrated Modeling of Minerva Medica to Identify the Dynamic Effects of Rail-Traffic Vibrations*, in *Buildings* 2023, 13, 1308.

M. Mercuri, M. Vailati, A. Gregori, *Lime-based mortar reinforced with randomly oriented polyvinylalcohol (PVA) fiber for strengthening historical masonry structures*, *Developments in the Built Environment*, (14), April 2023.

Y. Fan, Q. Huang, C. Yang, Y. Qin, *Experimental research on the integrated treatment of de-acidification and reinforcement of paper cultural relics by electrosorption*, *Archaeometry* 65 (1), pp. 184-195. 2023.

S. Yang, H. Wang, S. Liu, C. Sun, L. Zheng, P. Shi, H. Cong, B. Yu, *Research on deacidification and reinforcement of archives paper with calcium carbonate nanoparticles/modified hydroxypropyl cellulose*, *Integrated Ferroelectrics* 234 (1), pp. 88-99. 2023.

H. Zhao, P. Liu, Y. Huang, H. Zhang, *Nanocomposites composed of modified natural polymer and inorganic nanomaterial for safe, high-efficiency, multifunctional protection of paper-based relics*, *Science China Technological Sciences* 66, pp. 2225-2236. 2023.

N. Yang, G. Van der Snickt, S. Pizzimenti, K. J. van den Berg, *Nascent oxygen innovation in art conservation: cold atmospheric pressure plasma-generated monoatomic oxygen for the non-contact cleaning of works of art*, in *Working Towards a Sustainable Past. ICOM-CC 20th Triennial Conference Preprints*, Valencia, 18–22 September 2023 / Bridgland, J. [edit.]

P. Irizar Marino, A. Pintor Rial, I. Martinez Arkarazo., M. A. Olazabal Dueñas, L. Ruiz Rubio, P. Cardiano, O. Gómez Laserna, *Bio-based hybrid nanocomposites as multifunctional sustainable materials for stone conservation*, *Progress in Organic Coatings* 185. 2023.

P. Cennamo, R. Scielzo, M. Rippa, G. Trojsi, S. Carfagna, E. Chianese, *UV-C irradiation and essential-oils-based product as tools to reduce biodeteriorates on the wall paints of the archeological site of Baia (Italy)*, *Coatings* 13 (6), 1034. 2023.

J. Zhang, O. Ma, X. Zheng, K. Cheng, R. Lang, *Study on anti-weathering protection of excavated ancient stone arch bridge with nano-composites*, *Coatings* 13, 1898. 2023.

D. Isola, F. Bartoli, A. C. Municchia, H. J. Lee, S. H. Jeong, Y. J. Chung, G. Caneva, *Green biocides for the conservation of hypogeal mural paintings raised from western and eastern traditions: evaluation of interference on pigments and substrata and multifactor parameters affecting their activity*. *Journal of Cultural Heritage* 61, pp. 116-126. 2023

F. Gabriele, R. Ranaldi, L. Bruno, C. Casieri, L. Rugini, N. Spreti, *Biodeterioration of stone monuments: studies on the influence of bioreceptivity on cyanobacterial biofilm growth and on the biocidal efficacy of essential oils in natural hydrogel*, *Science of the Total Environment* 870, 161901. 2023.

W. He, J. Ou, F. Wang, S. Lei, X. Fang, W. Li, A. Amirfazl, *Transparent and superhydrophobic coating via one-step spraying for cultural relic protection against water and moisture*, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 662, 130949. 2023.

M. Luci, F. De Leo, D. De Pascale, C. Galasso, M. F. La Russa, *Surface-active ionic-liquid-based coating as anti-biofilms for stone: an evaluation of their physical properties*, *Coatings* 13 (10), 1669. 2023.

I. Onescu, E. Onescu, M. Mosoarca, *Seismic risk assessment and crisis management for historical buildings in Timisoara*, *Journal of Building Engineering* 72, 106665. 2023.

W. Yang, X. Zou, P. Liu, M. Wang, Y. Su, *Method for seismic performance evaluation of fasteners used for securing cultural artifacts*, *Structures* 47, pp. 2006-2024. 2023.

N. Pearson, B. S. Thompson, *Saving two fish with one wreck: maximizing synergies in marine biodiversity conservation and underwater cultural heritage protection*, *Marine Policy* 152, 105613. 2023.

A. Donato, M. Novàk, M. Novàkovà, M. F. La Russa, S. A. Ruffolo, M. Ricca, *A preliminary study of unconventional coatings for the conservation of underwater cultural heritage within the TECTONIC project*, *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence, Special Sessions I, 20th International Conference*, pp. 207-213. 2023.

M. Lupia, G. Gagliardi, G. Cario, F. C. Gaccio, V. D'Angelo, P. Folino, *A smart system for environmental parameter monitoring in underwater archaeological sites*, *Electronics* 12 (13), 2918. 2023.

S. Lagomarsino, A. Penna, A. Galasco, S. Cattari, *TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*, *Engineering Structures* 56, pp. 1787-1799.