
Ambiente e patrimonio a rischio

Sfide tra conservazione e cambiamento



Ambiente e patrimonio a rischio

Sfide tra
conservazione e
cambiamento

Colophon

Questo volume e gli esiti di ricerca in esso pubblicati sono stati finanziati dall'Unione Europea - NextGenerationEU attraverso il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) Missione 4 "Istruzione e ricerca" Componente 2 "Dalla ricerca all'impresa" Investimento 1.5 - Ecosistema ECS_00000043 "iNEST - Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem" (CUP F43C22000200006) - Spoke 4.

Ambiente e patrimonio a rischio. Sfide tra conservazione e cambiamento

a cura di

Pierpaolo Campostrini
Sara Di Resta
Paolo Faccio
Laura Rappa
Enrico Rinaldi

ISBN (cartaceo)

979-12-5953-201-5

ISBN (digitale)

979-12-5953-184-1

DOI

10.57623/979-12-5953-184-1



Il presente volume è pubblicato in modalità Open Access Gold. Il file è scaricabile dalla piattaforma Anteferma Open Books www.anteferma.it/aob/

editore

Anteferma Edizioni
via Asolo 12, Conegliano, TV
edizioni@anteferma.it

prima edizione ottobre 2025

progetto grafico

Giulia Ciliberto
Luca Coppola
Pietro Costa
Giacomo Dal Prà

copyright



Quest'opera è distribuita con Licenza Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

iNEST

Spoke 4
Città, Architettura
e Design Sostenibile

Coordinatore

Lorenzo Fabian

Coordinamento
scientifico

Massimiliano Condotta (Iuav)
Lorenzo Fabian (Iuav)
Luciano Gamberini (UniPD)
Elena Marchigiani (UniTS)
Alberto Sdegno (UniUD)
Lorenzo Bellicini (CRESME)
Pierpaolo Campostrini (CORILA)

Disclaimer

L'apparato iconografico presente è volto a supportare la comprensione dei prodotti della ricerca illustrati nel volume. Tutte le fonti delle figure sono state opportunamente segnalate dalle curatrici e dagli autori.

GRUPPO DI LAVORO

Università Iuav di Venezia (Spoke leader)

Sara Di Resta (coordinatore task 2.3), Maddalena Bassani, Paolo Faccio, Laura Rappa, Elena Tesser, Francesco Trovò.

CORILA

Pierpaolo Campostrini (coordinatore task 2.3), Enrico Rinaldi.

Università degli Studi di Padova

Laura Miola, Francesca Pazzaglia.

Università degli Studi di Udine

Alessandra Biasi, Giovanni Comi, Vincenzo d'Abramo, Giada Frappa, Margherita Pauletta, Claudia Pirina, Isabella Zamboni.

Università degli Studi di Trieste

Thomas Bisiani, Carlo Antonio Stival.

Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Vanessa Assumma, Isabella Giovanetti, Ilaria Innocenti.

CNR-ISAC Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima

Alessandra Bonazza, Fernanda Prestileo, Alessandro Sardella, Mariangela Zevola.

Fondazione LINKS

Rojin Bayat, Elios De Maio, Massimo Migliorini.

Politecnico di Torino

Jacopo Fiorenza.

Fondazione PIN

Franco Nicolucci, Luca Pezzati.

Università Ca' Foscari di Venezia

Andrea Campostrini, Elena Ghedini, Sabrina Manente, Federica Menegazzo, Michela Signoretto.

Università di Perugia

di Michele Alessandro

Universitat Politècnica de València

Pilar Bosch-Roig, Agustí Sala-Luis.

Co.New Tech. Srl

Fabrizio Benvenuti, Luca Benvenuti.

Indice

	Introduzione Benno Albrecht	p. 8
	Introduzione Lorenzo Fabian	p. 10
	Introduzione Roberto Beraldo	p. 12

SEZIONE 1	Attività di ricerca	p. 14
------------------	---------------------	-------

CAPITOLO 1 Valori del patrimonio e azioni di mitigazione	Introduzione Sara Di Resta	p. 18
	Variabili psicologiche e ambientali nell'interazione persona-ambiente e nella percezione dei beni architettonici e paesaggistici Francesca Pazzaglia, Laura Miola	p. 22
	Verso un modello di analisi del rischio e azioni di mitigazione per i macroeventi Enrico Rinaldi	p. 30

CAPITOLO 2 Innovazione e sostenibilità per l'intervento di restauro	Introduzione Paolo Faccio	p. 58
	Conservazione e gestione sostenibile del patrimonio culturale. Politiche, strumenti e prospettive di integrazione Sara Di Resta, Laura Rappa	p. 60
	Materiali e processi innovativi per la conservazione sostenibile del costruito Laura Rappa	p. 72

CAPITOLO 3 Scenari di intervento tra sicurezza, efficientamento e adaptive-reuse	Introduzione Francesco Trovò	p. 94
	Applicazione del modello di valutazione multirischio al centro abitato di Andreis (Pordenone) Alessandra Biasi, Margherita Pauletta, Isabella Zamboni, Giada Frappa	p. 98
	Strategie di riuso del patrimonio militare dismesso tra sostenibilità e consumo di risorse Claudia Pirina, Giovanni Comi, Vincenzo d'Abramo	p. 114
	Componenti di facciata per integrare/ adattare le unità abitative del patrimonio moderno Thomas Bisiani, Carlo Antonio Stival	p. 126
SEZIONE 2	Relazioni	p. 136
CAPITOLO 4 Patrimonio, rischio e nuove tecnologie	Introduzione Pierpaolo Campostrini	p. 140
	La valutazione economica del patrimonio culturale tra rischio e resilienza Vanessa Assumma, Isabella Giovanetti, Ilaria Innocenti	p. 142
	Patrimonio culturale a rischio in un contesto di cambiamento climatico: strumenti e strategie di protezione nei progetti Interreg CE INACO e PNRR CHANGES Alessandro Sardella, Mariangela Zevola, Fernanda Prestileo, Alessandra Bonazza	p. 154
	Musei virtuali e metaverso: progettare un'esperienza unificata tra ambienti VR e avatar intelligenti Massimo Migliorini, Rojin Bayat, Elios De Maio, Jacopo Fiorenza	p. 164
	Il Progetto ARTEMIS e il Reactive Heritage Digital Twin Luca Pezzati, Franco Niccolucci	p. 174

CAPITOLO 5 Nuove tecnologie per il restauro	Introduzione	p. 186
	Maddalena Bassani, Elena Tesser	
	Nanotecnologie fotocatalitiche: un approccio sostenibile per la conservazione del patrimonio architettonico	p. 190
	Federica Menegazzo, Michela Signoretto Elena Ghedini, Sabrina Manente, Alessandro di Michele, Andrea Campostrini	
	Estratti naturali e nanomateriali per proteggere le superfici lapidee dal biodeterioramento	p. 196
	Andrea Campostrini, Pilar Bosch-Roig, Agustí Sala-Luis, Elena Ghedini, Sabrina Manente, Michela Signoretto, Federica Menegazzo	
	M4P0 – Monitoraggio 4.0: modello operativo per la conservazione programmata del patrimonio architettonico in ambiente complesso	p. 204
	Fabrizio Benvenuti, Luca Benvenuti	

Autore Benno Albrecht

Affiliazione Rettore Università Iuav
di Venezia

Introduzione

Nel nostro Paese, l'evoluzione dell'ambiente costruito non può essere considerata senza far riferimento al patrimonio architettonico diffuso che ne costituisce parte essenziale e che partecipa alla costruzione degli assetti sociali, territoriali ed economici sui quali si fonda anche la macroregione del Nord-Est. Questo patrimonio è da sempre soggetto a rischi legati a cause naturali, ad azioni antropiche e a fenomeni di degrado accentuati negli ultimi anni da eventi estremi legati ai cambiamenti climatici.

Su questi temi si è concentrata l'attività di ricerca condotta tra il 2024 e il 2025 dal progetto PNRR, iNEST-Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 – City, Architecture, Sustainable Design. Il coordinamento dell'attività di ricerca RT2 – Heritage, recovery, conservation è affidato all'Università Iuav di Venezia e a CORILA – Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia. Il volume, curato da Pierpaolo Campostrini, Sara Di Resta, Paolo Faccio, Laura Rappa ed Enrico Rinaldi, restituisce gli esiti delle attività che hanno approfondito metodi, prospettive e scenari di analisi e d'intervento dedicati alla messa in sicurezza, alla salvaguardia e alla conservazione del patrimonio architettonico, con particolare attenzione ai beni non tutelati dal D.lgs. 42/2004 (*Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*) ed esposti, per questo, ad un continuo rischio di perdita.

Le modalità di restauro dell'architettura e di mitigazione dei rischi, unite alle domande poste dalla transizione energetica e digitale, hanno aperto il campo della sperimentazione di tec-

nologie e di materiali innovativi. Compatibilità, governo dell'interazione tra edificio e ambiente, possibilità di impiego di materiali naturali e/o riciclati, sono alcuni dei temi che caratterizzano la tradizione della ricerca Iuav e che nel volume si intrecciano con il contesto più ampio della ricerca avanzata di carattere nazionale e internazionale dedicata al *cultural heritage*.

Tra i numerosi aspetti di indagine, il gruppo di ricerca ha predisposto in via sperimentale un sistema di *tool* integrati per la conoscenza e la valutazione di strategie, tecnologie e materiali per la salvaguardia e la conservazione che considerano le diverse scale di intervento, dall'edificio al territorio. L'analisi multicriterio apre interessanti scenari sulle azioni finalizzate a ridurre le vulnerabilità, migliorare la resilienza, ottimizzare le prestazioni energetiche e di fruizione di edifici e siti, nel rispetto degli obiettivi di tutela e con l'ottimizzazione di costi e benefici.

Interventi di restauro e di mitigazione che tengano conto della componente ecologica e ambientale rientrano oggi nel pieno del dibattito culturale, affiancandosi al più generale obiettivo della trasmissione alle generazioni future del nostro patrimonio culturale.

La predisposizione di modelli di valutazione dei fenomeni di degrado e del rischio fornisce uno strumento di supporto alle decisioni che consente di orientare processi complessi, valutando nel dettaglio la necessità di miglioramento/ adeguamento di un edificio o complesso urbano riguardo ai macro-eventi e ai fenomeni fisiologici o patologici che incidono sui materiali e sulle strutture del patrimonio costruito.

Autore Lorenzo Fabian

Affiliazione Coordinatore Spoke 4,
Università Iuav di
Venezia

Introduzione

La transizione ambientale ed energetica esige uno sforzo collettivo di ripensamento dei territori, dei modi di abitarli e delle tecnologie impiegate per trasformarli.

In questo scenario si colloca il programma iNEST - Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, una delle nove iniziative finanziate nell'ambito degli Ecosistemi dell'Innovazione del PNRR. iNEST coinvolge undici università del Nord-Est italiano, con l'obiettivo di costruire una piattaforma integrata di ricerca e trasferimento tecnologico, capace di connettere saperi accademici, imprese e territori. Gli Spoke coordinati dalle università partner affrontano temi che spaziano dalla digitalizzazione alla sostenibilità, dalle scienze della vita ai sistemi industriali avanzati, in un quadro collaborativo che promuove l'innovazione territoriale su scala regionale e sovragiografica.

All'interno di questa infrastruttura, lo Spoke 4 City, Architecture and Sustainable Design coordinato dall'Università Iuav di Venezia, si concentra sui temi della progettazione sostenibile della città e dell'architettura. Le attività, oggi in fase di chiusura, si sono sviluppate attraverso un meccanismo di collaborazione tra università e imprese, finalizzato a promuovere la co-progettazione e la diffusione delle innovazioni tra mondo accademico e sistema produttivo. Il presente volume, che costituisce il terzo della collana dedicata, si inserisce in questo quadro, concentrandosi su un tema cruciale e trasversale: il rapporto tra ambiente e patrimonio.

La fragilità crescente dei contesti insediativi storici, esposti a pressioni ambientali, trasformazioni climatiche e istanze di rinnovamento funzionale, solleva interrogativi radicali. Come affrontare il cambiamento senza compromettere i valori culturali e materiali di cui il patrimo-

nio è portatore? Come coniugare la necessità di adattamento con l'esigenza di continuità? Come evitare che le strategie di efficientamento si traducano in forme di omologazione che cancellano le specificità locali? Lo Spoke 4 ha assunto il Nord-Est italiano quale caso studio, e in particolare l'area veneziana, in cui queste domande si intrecciano con un contesto urbano e territoriale che, per le sue caratteristiche geomorfologiche e culturali, può ancora essere letto come una «metafora planetaria» (Bevilacqua, 2006). Venezia e il suo territorio rappresentano infatti un laboratorio anticipatore delle sfide globali, in cui si misura la tenuta delle forme storiche dell'abitare di fronte al cambiamento climatico, alla pressione turistica, alla trasformazione dei modelli economici e insediativi.

In questo quadro, il patrimonio costruito non è solo oggetto da proteggere, ma anche risorsa attiva per immaginare strategie alternative di adattamento e trasformazione. La domanda che attraversa i contributi raccolti in questo volume è dunque se sia possibile delineare una traiettoria del Nord-Est nel miglioramento/adequamento del patrimonio edilizio e territoriale, capace di coniugare innovazione tecnologica, sostenibilità ambientale e rispetto delle specificità storiche. L'edilizia tradizionale contiene in sé un patrimonio di saperi costruttivi, di relazioni con il clima e i materiali locali che può costituire la base per approcci non omologati alla rigenerazione di architetture e territori. In questo senso, i temi affrontati nei diversi contributi del volume esplorano, da prospettive complementari, le potenzialità di una transizione che, partendo dalla conoscenza e valorizzazione del patrimonio locale, mette in tensione continuità e cambiamento, conservazione e innovazione.

Autore Roberto Beraldo

Affiliazione Presidente Ordine
degli Architetti
Pianificatori
Paesaggisti e
Conservatori della
Provincia di Venezia

Introduzione

Affrontare oggi il tema *Ambiente e patrimonio a rischio*, in un contesto emblematico come Venezia, significa riflettere su uno spazio culturale denso di storie, identità e tradizioni che hanno modellato il nostro modo di vivere e immaginare il futuro. Il patrimonio costruito è espressione di legami sociali profondi e, proprio per questo, la sua tutela è una responsabilità imprescindibile. Eventi naturali, azioni antropiche e fenomeni di degrado mettono costantemente alla prova la resilienza di questi beni, evidenziando quanto il progetto debba oggi affrontare sfide complesse e interconnesse. I temi affrontati nel volume pongono interrogativi etici cruciali. I ricercatori sono chiamati a delineare futuri possibili, affinché la governance politica, in ascolto delle competenze tecniche e operative, possa tradurli in strumenti efficaci di tutela e valorizzazione. Solo così i professionisti, parte finale della filiera del progetto, potranno esercitare pienamente il proprio ruolo. Negli ultimi anni, l'attenzione al patrimonio ha messo in luce criticità legate a rischi sempre più articolati, spesso acuiti da scelte di pianificazione inadeguate. Gli eventi estremi non solo danneggiano il patrimonio fisico, ma alterano profondamente il tessuto sociale dei territori. In questo quadro, diventa centrale l'elaborazione di strategie innovative e sostenibili, capaci di coniugare tradizione e innovazione in un equilibrio dinamico. Nel contesto italiano, la frammentazione della proprietà immobiliare – in particolare quella residenziale – ostacola i processi decisionali e rende ancora più urgente il dialogo tra ricerca, istituzioni e professioni.

Questo confronto deve generare un pensiero progettuale che superi gli interessi di parte, orientato a un bene collettivo fondato su principi di equità sociale.

Una visione integrata della professione, capace di mediare tra tecnica, tecnologia e sostenibilità economica, può guidare la filiera del progetto verso una qualità autentica del costruito e della sua tutela. In tal senso, il pensiero di Massimo Cacciari si dimostra ancora attuale: la sostenibilità, scriveva, non può essere un'aggiunta esterna al progetto, ma una sua qualità intrinseca. Un approccio riduttivo – solo normativo, tecnologico o energetico – rischia di compromettere la visione di lungo periodo che oggi è necessaria. La tutela del patrimonio, allora, va ripensata come strumento per migliorare la condizione umana, tenendo conto della bellezza, della relazione tra l'uomo e l'ambiente, e delle implicazioni morali delle nostre scelte. In questa prospettiva, la sostenibilità non si applica solo ai beni riconosciuti come patrimonio culturale, ma deve estendersi anche al costruito ordinario, che forma la struttura diffusa delle nostre città. In certi casi, la tutela potrebbe passare anche attraverso strategie di riduzione e sottrazione del costruito più fragile e meno significativo, per restituire qualità agli spazi e ai paesaggi urbani. Gli studi condotti rappresentano un'importante occasione di confronto e crescita in questa direzione. Grazie al contributo di ricercatori, esperti e professionisti, è possibile indagare molteplici approcci e strumenti per la sicurezza, la salvaguardia e la conservazione del patrimonio.

Sezione 1

GRUPPO DI LAVORO

Coordinatori	Pierpaolo Campostrini Sara Di Resta Paolo Faccio Laura Rappa Enrico Rinaldi
--------------	---

Università Iuav di Venezia	Sara Di Resta Paolo Faccio Laura Rappa Francesco Trovò
-------------------------------	---

Università degli Studi di Padova	Laura Miola Francesca Pazzaglia
-------------------------------------	------------------------------------

Università degli Studi di Udine	Alessandra Biasi Giovanni Comi Vincenzo d'Abramo Giada Frappa Margherita Pauletta Claudia Pirina Isabella Zamboni
------------------------------------	---

Università degli Studi di Trieste	Thomas Bisiani Carlo Antonio Stival
--------------------------------------	--

CORILA	Pierpaolo Campostrini Enrico Rinaldi
--------	---

Attività di ricerca

a cura di

Pierpaolo Campostrini
Sara Di Resta
Paolo Faccio
Laura Rappa
Enrico Rinaldi

Capitolo 1



In un contesto internazionale caratterizzato da diversità culturali e da una pluralità di significati associati al patrimonio, a emergere è il rischio di conflitti sia nell'identificazione sia nei metodi di conservazione e restauro dei beni.

Valori del patrimonio e azioni di mitigazione

Autore

Sara Di Resta

Affiliazione

Università Iuav di
Venezia



Roma, la città storica come “abaco” di patrimoni,
antichi e moderni.
S. Di Resta, 2024.

Introduzione

«Il patrimonio culturale è un insieme di risorse ereditate dal passato che le persone identificano [...] come riflesso ed espressione dei loro valori, credenze, conoscenze e tradizioni costantemente in evoluzione. Esso comprende tutti gli aspetti dell'ambiente derivati dall'interazione, nel tempo, fra le persone e i luoghi».

Convenzione di Faro, 2005

Il concetto di valore è al centro dell'indagine e degli orientamenti di metodo del restauro architettonico fin dalle sue origini. Ne *Il culto moderno dei monumenti*, Alois Riegl, oltre a introdurre una visione dialettica dell'interpretazione dei monumenti, evidenziava la stretta correlazione tra il riconoscimento di valore e l'azione di salvaguardia (Riegl, 1903). Questo concetto si ritrova, tra gli altri riferimenti, nella *Carta di Venezia*, che riconosce ai monumenti una duplice polarità: «L'intervento deve puntare alla salvaguardia sia del valore artistico sia di quello storico» (ICOMOS, 1964, art. 3). Lo stesso *Codice dei Beni culturali e del Paesaggio* ribadisce che la «trasmissione dei valori culturali» del bene sia parte degli obiettivi del restauro (D.lgs. 42/2004, art. 29).

In un contesto internazionale caratterizzato da profonde diversità culturali e da una pluralità di significati associati al patrimonio, a emergere è il rischio di conflitti sia nell'identificazione sia nei metodi di conservazione e restauro degli edifici: «Questo impone a tutti i responsabili della salvaguardia del patrimonio culturale il compito di essere sempre più sensibili ai problemi e alle scelte che essi devono affrontare nel perseguire i propri obiettivi. Ciascuna comunità, attraverso la propria memoria collettiva e la consapevolezza del proprio passato, è responsabile dell'identificazione e della gestione del proprio patrimonio» (Carta di Cracovia, 2000). Se la patrimonializzazione è dunque un processo di scelta di valori, è altrettanto vero che essi possono cambiare nel tempo. Tale variabilità costituisce la specificità del patrimonio nei diversi momenti della storia, ed è dentro a questo processo di cambiamento che ogni comunità sviluppa consapevolezza della necessità di tutelare singoli elementi del costruito o sistemi di essi.

L'esigenza di mettere la persona e i valori umani al centro di un'idea allargata e interdisciplinare di patrimonio culturale si ritrova nella *Convenzione di Faro*, che in quest'ambito riconosce un ruolo centrale alle comunità patrimoniali, costituite da «persone che attribuiscono valore a degli aspetti specifici del patrimonio

culturale, che essi desiderano, nel quadro di un'azione pubblica, sostenere e trasmettere alle generazioni future» (Convenzione di Faro, 2005, art. 2).

Oltre alla natura conflittuale dei valori di cui i monumenti sono stati investiti nel tempo (Choay, 1993), architetture e siti possono essere portatori di significati contraddittori in relazione alle istanze e al portato storico e culturale di comunità diverse: compito degli Stati è anche quello di stabilire i procedimenti di conciliazione capaci di gestire equamente situazioni di incompatibilità che mettono in pericolo il patrimonio culturale.

Ai nostri giorni, è consistente la frazione costruita al centro di processi di riconoscimento valoriale pur non rientrando nelle consuete maglie degli strumenti legislativi di tutela. Essenziale in quest'ottica è l'individuazione delle condizioni con cui si possano applicare metodologie di restauro agli edifici non tutelati o 'tutelati' soltanto da misure di pianificazione locale (SIRA, 2023), comprendendo come queste azioni possano contribuire a conservare non soltanto i singoli manufatti, ma l'eredità collettiva e le qualità paesaggistiche di insediamenti riferibili ad un passato più o meno recente.

Riferimenti bibliografici

Choay, F. (1993) 'L'invenzione del Patrimonio Storico', in *Rassegna di Architettura e di Urbanistica*, 80-81, pp. 7-11.

Consiglio d'Europa (2005) *Convenzione di Faro sul valore del patrimonio culturale per la società*. Faro, 27 ottobre 2005. Strasburgo: Consiglio d'Europa.

International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (2000) *Carta di Cracovia: principi per la conservazione e il restauro degli edifici storici*. Cracovia: ICOMOS.

International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (1964) *Carta di Venezia per la conservazione e il restauro dei monumenti e dei siti*.

Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC) (2004) Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 - *Codice dei beni culturali e del paesaggio*. Disponibile su: <https://www.normattiva.it/eli/id/2004/02/24/004G0066/CONSOLIDATED/20200914> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).

Riegl, A. (1903) *Der moderne Denkmalkultus: sein Wesen und seine Entstehung*. Wien / Leipzig: W. Braumüller. Trad. it. *Il culto moderno dei monumenti. Il suo carattere e la sua genesi*. Bologna: Officina Edizioni, 1980.

Società Italiana per il Restauro dell'Architettura (SIRA) (2023) *Documento di indirizzo per la qualità dei progetti di restauro dell'architettura*. Disponibile su: <https://www.sira-restauroarchitetonico.it> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).

Autori

Francesca Pazzaglia
Laura Miola

Affiliazione

Università degli Studi
di Padova



Interazione persona-ambiente.
S. Frisina, 2025.

Variabili psicologiche e ambientali nell'interazione persona-ambiente e nella percezione dei beni architettonici e paesaggistici

L'INTERAZIONE PERSONA-AMBIENTE (P-A)

Nel corso della loro vita quotidiana gli esseri umani sono in continua interazione con l'ambiente circostante, naturale o costruito, che può in misura maggiore o minore soddisfare le esigenze di chi lo abita. Uno degli assunti della psicologia ambientale, disciplina psicologica sviluppatasi come linea di ricerca autonoma a partire dalla metà del secolo scorso, è che l'esperienza umana si snoda necessariamente all'interno di uno spazio e di luoghi che fanno da sfondo a pensieri, azioni, relazioni, emozioni, in una dinamica di influenza reciproca. Le persone, infatti, modificano costantemente il loro ambiente, e, nello stesso tempo, le caratteristiche ambientali influenzano comportamenti, stati d'animo, funzionamento cognitivo e le reazioni fisiologiche umane (Gifford, 2014), in una dinamica complessa, in cui variabili personali e ambientali (queste ultime relative sia all'ambiente fisico che sociale), interagiscono costantemente, influenzandosi reciprocamente.

Riconoscere che le caratteristiche dell'ambiente fisico possano avere un impatto su molteplici aspetti dell'esperienza individuale e sociale, sottolinea l'importanza di approfondire in linea teorica gli elementi di questa relazione, richiamando una precisa responsabilità in coloro che, per il ruolo sociale e/o professionale ricoperto, sono chiamati in gioco nella progettazione e realizzazione di tali spazi.

Già a partire dagli anni Settanta del secolo scorso, numerose ricerche hanno messo in luce l'impatto negativo di alcune caratteristiche ambientali su qualità della vita e benessere fisico e psicologico. La letteratura sugli stress ambientali (Baroni e Berto, 2013) ha ampiamente dimostrato che rumore, traffico, temperature estreme, inquinamento hanno un impatto negativo sulla salute fisica (con incremento delle manifestazioni fisiologiche dello stress cronico, quali aumento della pressione arteriosa, rilascio di cortisolo, aumento degli indici di infiammazione), e conseguente aumento delle malattie non-trasmissibili (ad esempio respiratorie e cardiovascolari), che costituiscono la causa più frequente di morte nelle società occidentali. A risentire di queste variabili ambientali negative sono soprattutto persone con maggiori fragilità quali bambini, anziani, persone con basso reddito, o affette da malattie croniche (Punzi *et al.*, 2020), per le quali le caratteristiche ambientali diventano ancora più dirimenti nell'influenzare la qualità della vita. Ad esempio, già da diversi decenni, è stato scientificamente dimostrato l'impatto negativo del rumore sullo sviluppo infantile: abitazioni o scuole rumorose comportano un ritardo nell'apprendimento della lettura, incidono negativamente sulla motivazione allo studio e

si associano a risultati scolastici più scadenti (Bronzaft, 1981). Parimenti, il sovraffollamento abitativo è in relazione con maggiore percezione di stress e di pericolo ambientale, particolarmente per le donne (Fornara *et al.* 2022). A tutto ciò si aggiunge un diffuso allarme, che sottolinea i rischi, nello sviluppo infantile, ma non solo, dell'estraniamento dell'essere umano dal mondo naturale e dagli ambienti che per millenni hanno fatto da sfondo alla vita dei Sapiens sulla terra (Barbiero e Berto, 2024).

La crescente tendenza mondiale all'urbanizzazione (Nazioni Unite, 2018) porta a un acuirsi di questi fenomeni, che possono essere mitigati da politiche urbanistiche e architettoniche centrate sul benessere degli individui e delle comunità. Ci si riferisce in tal senso ad approcci alla progettazione distinti e complementari, che insieme concorrono alla realizzazione di spazi urbani generatori di benessere, sintetizzati nelle forme di progettazione partecipata, orientata alla persona, biofilica e rigenerativa (Gifford, 2014; Pazzaglia e Tizi, 2022). Tali forme progettuali si declinano nei vari ambiti dell'esperienza umana (casa, lavoro, studio, tempo libero) e si applicano a diverse scale ambientali, dagli spazi interni, ad esempio quelli domestici e lavorativi, al quartiere, alla città e ad una intera regione, quali aree interconnesse e in un approccio multi-luogo (Bonaiuto *et al.*, 2004).

MODELLI DI ADATTAMENTO P-A

La riflessione teorica e le ricerche empiriche sull'interazione P-A hanno prodotto l'interessante costrutto di adattamento tra l'individuo e i suoi spazi (*person-environment fit*), con cui si descrive il livello di compatibilità tra una persona e il suo ambiente. Una buona compatibilità si verifica quando c'è allineamento tra le capacità, i bisogni e i valori di una persona e le opportunità, le richieste e la cultura dell'ambiente in cui si trova. Questo adattamento ha un impatto diretto sul benessere psicologico, sulla soddisfazione esistenziale, sulle prestazioni e sulla riduzione dello stress (Zhang *et al.*, 2024). I modelli più influenti sono stati proposti negli anni Settanta con l'intento di spiegare l'evoluzione dell'invecchiamento e le dinamiche di interazione P-A con l'avanzare dell'età. Particolarmente significativo è il modello ecologico di Lawton e Nahemow (1973) che analizza l'interazione tra pressione (stress) ambientale e abilità personali. Data l'enfasi sull'invecchiamento, l'ambiente è considerato nei termini negativi di richieste e pressioni poste all'individuo e di come queste possano diventare eccessive al diminuire delle risorse (fisiche, cognitive, sociali) producendo un mala-adattamento che si ripercuote negativamente sulla qualità di vita. Descrivendo la relazione tra pressione e competenza, Lawton e Nahemow (1973) prevedono che l'area di adattamento ottimale si restringa al ridursi delle risorse personali. Ciò significa che caratteristiche ambientali non del tutto favorevoli non hanno un impatto particolarmente negativo in persone con alto livello di competenze (fisiche, cognitive, economiche, sociali), data l'effettiva possibilità di adattare l'ambiente alle loro esigenze o di mettere in atto strategie efficaci per fronteggiarne gli aspetti negativi. Diversamente, in presenza di fragilità, si riducono drasticamente le possibilità sia di modificare l'ambiente a proprio vantaggio, che di adattarsi a questo senza subire pesanti conseguenze. Ne consegue che, al ridursi delle competenze, si riduce anche la gamma di caratteristiche ambientali tali da garantire un adattamento ottimale, da cui deriva la necessità di porre particolare attenzione alla progettazione specifica e mirata di edifici scolastici, di cura, residenze per anziani, oppure di quartieri urbani periferici, abitati da persone anziane sole e/o a basso reddito. Dato che questi sono solo alcuni fra i tanti potenziali fattori di fragilità – si pensi infatti a malattie croniche,

a situazioni temporanee o permanenti di disabilità – risulta chiara l'importanza dell'approccio progettuale ispirato all'*Universal Design* e mirato a soddisfare i bisogni di ampie porzioni di una popolazione caratterizzata da grande variabilità (Punzi *et al.*, 2020). Nell'analisi dell'adattamento P-A, modelli successivi hanno messo in luce l'opportunità di analizzare gli effetti dell'ambiente non solo nei termini di una pressione esercitata sull'individuo, ma anche come risorsa in grado di soddisfarne le esigenze (Carp e Carp, 1984; Kahana, 1982). In tale ottica anche il ruolo della persona si arricchisce, passando da un esercizio passivo di abilità per far fronte agli stress ambientali, a un dispiegamento di risorse (competenze, ma anche valori, motivazioni, aspettative) che concorrono a operare attivamente nell'ambiente per plasmarlo alle proprie esigenze. Questo cambiamento di paradigma ha risvolti anche nel modo di intendere la progettazione, in generale e per le persone fragili in particolare. Infatti, secondo il paradigma stress/competenza, il fine primario della progettazione è l'eliminazione di elementi che costituiscono una pressione eccessiva sulle persone, con la riduzione degli stress ambientali (eccessivo rumore, affollamento, clutter visivo, ecc.), mentre il secondo paradigma richiama una progettazione mirata ad aumentare autonomia e benessere, con ambienti comprensibili, coerenti, rigenerativi, stimolanti, capaci di potenziare le risorse individuali in una costante interazione in cui anche la persona è messa nelle condizioni di intervenire positivamente sull'ambiente (Pazzaglia e Tizi, 2022).

VARIABILI IMPLICATE NELL'ADATTAMENTO P-A

Nell'analisi dell'adattamento P-A è necessario tenere conto delle diverse dimensioni implicate nei due versanti della interazione. Come sostenuto da Zhang *et al.* (2024), vanno individuate e tenute distinte le diverse componenti in gioco, che si distinguono in variabili oggettive e soggettive, sia per l'ambito personale che per quello ambientale.

FIGURA 01 – P. 28

Le variabili oggettive riguardanti la persona sono quelle di tipo anagrafico, quali l'età e il genere, ma anche l'etnia, il livello di istruzione, l'occupazione, il reddito, le condizioni di salute e familiari. Le variabili soggettive rientrano nel campo delle percezioni, distinte in percezioni di sé e percezioni relative all'ambiente. Le prime comprendono le percezioni di autoefficacia, cioè quanto ci si sente in grado di affrontare situazioni specifiche (muoversi autonomamente, interagire con gli altri, ecc.) o quelle relative a rappresentazioni specifiche di sé (sono una persona sana, mi reputo una persona sportiva, sono soddisfatto della mia vita). Le percezioni relative all'ambiente riguardano l'insieme di idee e preferenze sull'ambiente costruito: la preferenza per vivere in un piccolo centro piuttosto che in una grande città, per l'uso dei mezzi pubblici, per risiedere in appartamento anziché casa singola, piano alto o piano terra. Va sottolineato che le variabili oggettive interagiscono con quelle soggettive: la salute effettiva di una persona ne influenza la percezione di salute e l'autoefficacia nello svolgere determinate azioni, oltre che influenzare le preferenze. Ad esempio, con l'aumentare dell'età può diminuire l'autoefficacia nella guida, con conseguente preferenza per il trasporto pubblico.

Sul versante ambientale, le variabili oggettive riguardano il tipo e la scala di un edificio, la densità abitativa di un quartiere, la sicurezza, gli elementi di rischio (rischio sismico, alluvione, ecc.). A questi elementi corrispondono le percezioni soggettive rispetto a luoghi specifici: alla densità abitativa

di un certo quartiere può corrispondere la percezione soggettiva di affollamento, a determinate caratteristiche ambientali (es. quantità di verde) può corrispondere la percezione di rigeneratività ambientale. Altre variabili soggettive nell'ambito ambientale sono: l'attaccamento per il proprio quartiere, la soddisfazione residenziale, il senso di comunità, la percezione di sicurezza e di rischio di dissesti idrogeologici. Anche in questo caso variabili oggettive e soggettive sono in relazione. La complessa interazione tra variabili personali e ambientali (oggettive e soggettive) porta di volta in volta a forme più o meno efficaci di adattamento.

RIGENERATIVITÀ AMBIENTALE E PERCEZIONE DEL RISCHIO NEL NORD-EST ITALIANO. IL CASO DI PIAZZOLA SUL BRENTA

L'approccio relativo all'adattamento P-A è stato applicato a uno studio condotto nell'ambito del progetto PNRR, iNEST-Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 – City, Architecture, Sustainable Design, RT2 – Heritage, recovery, conservation. Si tratta di un caso-studio sulla cittadina di Piazzola sul Brenta (Miola *et al.*, 2025), in provincia di Padova, scelta a seguito di un'analisi approfondita del suo percorso storico e urbanistico che aveva evidenziato come l'assetto urbano si fosse organizzato attorno all'edificio di Villa Contarini e al suo parco, per costituire un punto di riferimento per la viabilità e la vita sociale dell'intero territorio (Montanari *et al.*, 2023).

FIGURA 02 – P. 29

FIGURA 03 – P. 29

Piazzola sul Brenta, inoltre, è paradigmatica di altri centri del Nord-Est caratterizzati da edifici di rilevante pregio storico e architettonico uniti a elementi naturali di grande valore paesaggistico. Tuttavia, al pari di numerose aree analoghe, anche Piazzola è inserita all'interno di un territorio fragile, a rischio di fenomeni idrogeologici esacerbati dal cambiamento climatico. Si è deciso quindi di analizzare il punto di vista degli abitanti del luogo, innanzitutto per verificare se la villa ha ancora quel ruolo di riferimento per la vita culturale e economica rivestito in passato e come i residenti si pongono rispetto a possibili rischi a tale patrimonio. Aspetti soggettivi di percezione ambientale, in particolare il rischio di fenomeni idrogeologici avversi e la percezione di rigeneratività del paesaggio, sono stati rilevati attraverso questionari, e messi in relazione a misure di benessere della popolazione: benessere mentale, soddisfazione residenziale e senso di comunità. I risultati hanno confermato che la villa e le zone adiacenti (parco e piazza antistante) rivestono ancora un ruolo centrale, essendo la villa indicata come riferimento storico/culturale dal 95% ed economico dal 60% del campione, con elevate emozioni negative legate all'idea di un loro danneggiamento, particolarmente per quei residenti ad alta soddisfazione residenziale. Un altro risultato significativo è la correlazione negativa tra percezione del rischio, soddisfazione residenziale e benessere mentale. Coloro che hanno una più elevata percezione del rischio si dichiarano anche meno soddisfatti di vivere a Piazzola e percepiscono il loro benessere mentale come meno buono. Nel complesso, questo studio-pilota mette in evidenza l'importanza di tenere conto di aspetti soggettivi di percezione del territorio e dei suoi rischi, sia per individuare quegli edifici e porzioni del territorio considerati particolarmente rilevanti – alla cui perdita risulterebbero associate reazioni affettive particolarmente negative – sia per mettere in evidenza che la percezione del rischio può essere a detrimento

della soddisfazione residenziale e del benessere psicologico dei residenti. Il territorio del Nord-Est presenta grandi opportunità, derivate dal connubio tra elementi storici e artistici inseriti in ambienti naturali con forti elementi di rigeneratività (Miola e Pazzaglia, 2025). È tuttavia un territorio che ha subito fenomeni alluvionali e che viene percepito a rischio dalla sua popolazione. Questa percezione si associa a minore soddisfazione residenziale e benessere psicologico. L'opera di salvaguardia dovrebbe tenere conto di questi aspetti prettamente legati alle concezioni e rappresentazioni di chi in questo territorio vive, per la progettazione di interventi capaci di riportare in sicurezza il territorio stesso ma anche di incidere sulla soddisfazione residenziale, il senso di comunità, la percezione di rigeneratività, tutti aspetti fortemente legati alla qualità della vita e alla messa in atto di comportamenti diffusi di protezione e salvaguardia del territorio stesso.

Riferimenti bibliografici

- Barbiero, G., Berto, R. (2024) *Introduzione alla biofilia. La relazione con la natura tra genetica e psicologia*. Roma: Carocci.
- Baroni, M.R., Berto, R. (2013) *Stress ambientale. Cause e strategie di intervento*. Roma: Carocci.
- Bonaiuto, M., Bonnes, M., Continisio, M. (2004) 'Neighborhood evaluation within a multiplace perspective on urban activities', in *Environment and Behavior*, 36(1), pp. 41-69. Disponibile su: <https://doi.org/10.1177/0013916503251444>.
- Bronzaft, A.L. (1981) 'The effect of a noise abatement program on reading ability', in *Journal of Environmental Psychology*, 1, pp. 215-222. Disponibile su: [https://doi.org/10.1016/S0272-4944\(81\)80040-0](https://doi.org/10.1016/S0272-4944(81)80040-0).
- Carp, F.M., Carp, A. (1984) 'A complementary/congruence model of well-being or mental health for the community elderly', in I. Altman, M.P. Lawton, J.F. Wohlwill (a cura di) *Elderly people and the environment. Human behavior and environment*. Vol. 7. Boston, MA: Springer, pp. 279-336.
- Fornara, F., Mosca, O., Bosco, A., et al. (2022) 'Space at home and psychological distress during the COVID-19 lockdown in Italy', in *Journal of Environmental Psychology*, 79, pp. 1-10. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101747>.
- Gifford, R. (2014) 'Environmental psychology matters', in *Annual Review of Psychology*, 65, pp. 541-580. Disponibile su: <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115048>.
- Kahana, E. (1982) 'A congruence model of person-environment interaction', in M.P. Lawton, P.G. Windley, T.O. Byerts (a cura di) *Aging and the environment: theoretical approaches*. New York: Springer, pp. 97-121.
- Lawton, M.P., Nahemow, L. (1973) 'Ecology and the aging process', in C. Eisdorfer, M.P. Lawton (a cura di) *The psychology of adult development and aging*. Washington, DC: American Psychological Association, pp. 619-674. Disponibile su: <https://doi.org/10.1037/10044-020>.
- Miola, L., Pazzaglia, F. (2025) 'Perceived restorativeness and environmental quality in relation to well-being, residential satisfaction, and sense of community: an analysis in Northeast Italy', in *Frontiers in Psychology*, 16:1522098. Disponibile su: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1522098>.
- Montanari, G., Giordano, A., Guidarelli, G., et al. (2023) 'A strategic interpretation of landscape through interaction between natural, built and virtual environments: the case study of Piazzola sul Brenta', in *Sustainability*, 15, 13445. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/su151813445>.
- Nazioni Unite. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018) *World urbanization prospects 2018*. Disponibile su: <https://esa.un.org/unpd/wup/>
- Punzi, L., Chia, M., Cipolletta, et al. (2020) 'The role of architectural design for rheumatic patients' wellbeing: the point of view of environmental psychology', in *Reumatismo*, 72(1), pp. 60-66. Disponibile su: <https://doi.org/10.4081/reumatismo.2020.1251>.
- Zhang, Z., Zhang, W., Zhang, S., et al. (2024) 'Person-environment fit theory in built environment: a scoping review', in *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. Disponibile su: <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2373824>.

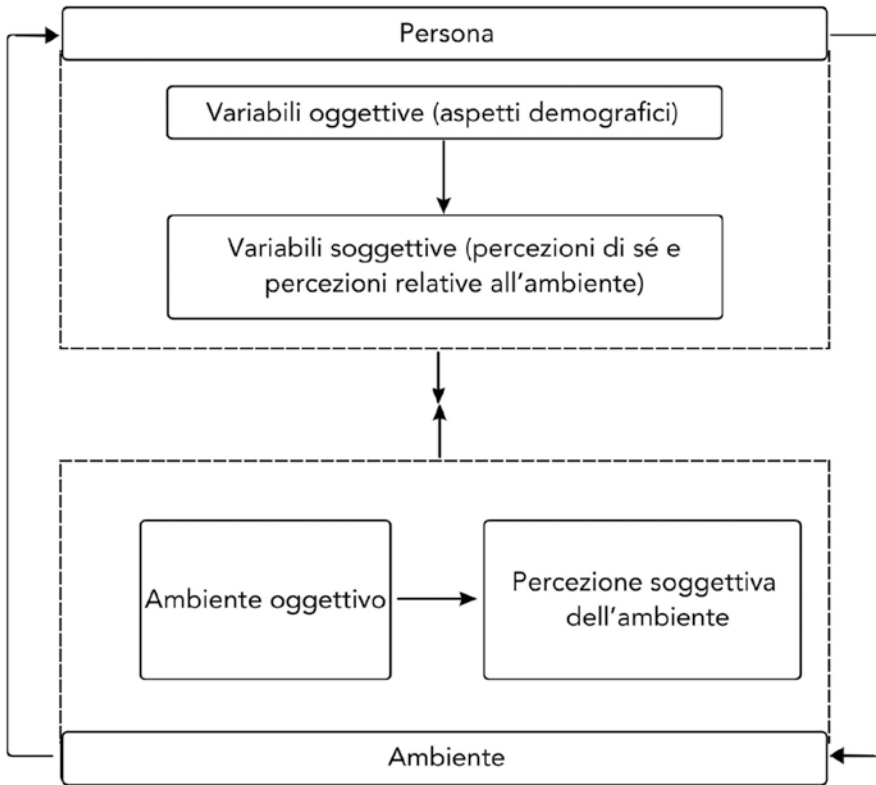


FIGURA 01

Variabili implicate nell'adattamento P-A.
M. Mazzella, 2025.



FIGURA 02

Immagine della piazza e del giardino antistante villa Contarini di Piazzola sul Brenta.
G. Montanari e G. Lin, 2023.

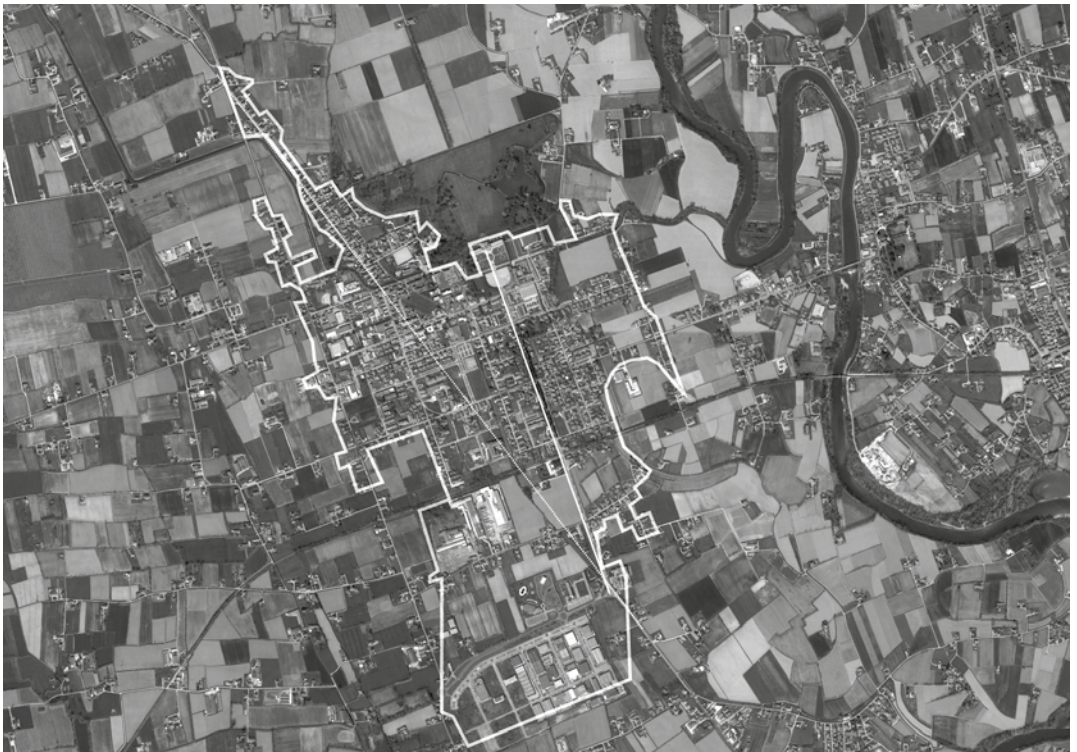


FIGURA 03

Confine amministrativo del Comune di Piazzola.
Confronto orientamento dell'antico asse romano e di quello della Villa.
G. Montanari, 2023.

Autore	Enrico Rinaldi
--------	----------------

Affiliazione	CORILA
--------------	--------



Cantiere di restauro a Venezia.
Elaborazione del modello AI ChatGPT 5
su prompt di E. Rinaldi, 2025.

Verso un modello di analisi del rischio e azioni di mitigazione per i macroeventi

Il patrimonio storico architettonico italiano e internazionale è da sempre sottoposto a rischi dovuti ad eventi naturali (sisma), ad azioni antropiche (incendi, incidenti industriali, sprawling urbano), a fenomeni fisiologici di degrado dovuti al trascorrere del tempo.

Negli ultimi decenni tale patrimonio è soggetto, inoltre, in maniera crescente agli eventi collegati al *climate change* (alluvioni, frane, siccità), accentuati dalla particolarità della conformazione idrogeologica e dall'alta densità abitativa di alcune regioni, che lo rendono estremamente fragile, vulnerabile e bisognoso di interventi di adeguamento/miglioramento. Inoltre, in molte aree urbane, è urgente mitigare il fenomeno delle isole di calore, che comporta non solo disagi crescenti, ma che genera inoltre sprechi energetici ed elevate emissioni di CO₂ in atmosfera.

In questo contesto è necessaria l'adozione di metodologie e tecnologie per la mitigazione che tengano conto delle particolarità e fragilità delle costruzioni storiche, in un approccio sostenibile ed integrato che rispetti l'ecosistema, considerando anche il valore culturale e l'uso del bene.

È necessario inoltre relazionarsi con i temi della sostenibilità sociale e dell'inclusione, considerando l'evoluzione degli scenari sociali, economici, antropologici, a scala nazionale e internazionale.

UNA METODOLOGIA INTEGRATA PER LA GESTIONE DEI RISCHI E LA SALVAGUARDIA DEL PATRIMONIO CULTURALE

Nell'ambito del progetto PNRR, iNEST-Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 – City, Architecture, Sustainable Design, RT2 – Heritage, recovery, conservation è stata predisposta una metodologia che considera in modo sinergico le problematiche di salvaguardia e fruizione del patrimonio culturale e la loro mitigazione, considerando anche la concatenazione di rischi diversi che possono agire contemporaneamente o “a cascata”: importante in tal senso è l'ottimizzazione dell'applicazione delle Metodologie, Tecnologie, Tecniche e Materiali (di seguito MTTM) per le differenti necessità di mitigazione.

La metodologia si basa su un insieme di strumenti di conoscenza, valutazione e applicazione definiti nel corso della ricerca: conoscenza del sistema edilizio/urbano; conoscenza dei fenomeni e degli eventi che causano danni e degradi; analisi del rischio e della vulnerabilità dei beni; identificazione di MTTM applicabili al restauro, alla ricostruzione, al miglioramento; sistemi di supporto alle decisioni per la selezione delle MTTM più appropriate.

Con riferimento alla figura 01, un evento (1), con una determinata intensità, può avere un impatto specifico sull'edificio e in particolare su alcune sue

componenti; l'edificio è quindi il “bersaglio” le cui componenti possono subire determinati tipi di degrado e/o danneggiamento.

Le pericolosità del sito e le vulnerabilità dell'edificio sono analizzate con un modello di analisi dei rischi (2). Gli indicatori di pericolosità e vulnerabilità – corrispondenti ai componenti di edifici e siti – vengono correlati con le MTTM più appropriate (3) per la mitigazione.

La valutazione delle opzioni di intervento può essere supportata da strumenti decisionali come l'analisi multicriteria (4), che consente di confrontare diverse opzioni di mitigazione per un dato componente del sito o dell'edificio sulla base di un insieme di criteri prestazionali, tecnici, ambientali, economici.

FIGURA 01 – P. 48

Gli insiemi di MTTM identificati in questo screening iniziale possono essere successivamente ristretti per derivare le opzioni più appropriate per uno specifico contesto (edificio o sito).

Le relazioni tra eventi, tipologie di danno/impatto, elementi/componenti dell'edificio o del sito e MTTM sono molteplici: ad esempio un evento può causare una o più tipologie di danno; una tipologia di danno può interessare uno o più elementi/componenti dell'edificio o del sito; una o più MTTM possono essere applicate per mitigare o prevenire il danno in un elemento. Per ciascun evento, componente dell'edificio o del sito, tipologia di danno, è stata effettuata un'approfondita ricognizione delle MTTM disponibili, evidenziandone vantaggi, svantaggi e limiti di applicabilità, sinergie, interazioni; da queste informazioni sono state ricavate matrici di performance, rispetto ai criteri menzionati, ponendo particolare attenzione ai criteri di valutazione di interesse nel contesto storico, come applicabilità, impatto sull'edificio, reversibilità ecc.

CRITERI DI VALUTAZIONE DELLE MTTM

Le MTTM possono essere valutate e confrontate con criteri di “beneficio” (una migliore prestazione della MTTM corrisponde a un beneficio maggiore) o “costo” (una migliore prestazione della MTTM corrisponde a un costo inferiore). Ad esempio, un beneficio di una tecnologia può essere la sua “efficacia” di mitigazione (la capacità di ridurre la vulnerabilità di un elemento strutturale al sisma, di ridurre la pericolosità di un sito alle inondazioni, ecc.). I costi possono essere non solo i costi economici dell'applicazione della MTTM (costo delle attrezzature, della manodopera, dei materiali), ma anche l'impatto dell'intervento sull'edificio o sul sito, la necessità di futura manutenzione, il tempo di esecuzione ecc.

I criteri di valutazione delle MTTM possono essere suddivisi in tre categorie: “applicabilità e impatti sull'edificio e sul sito”, “costi e logistica di cantiere”, “sostenibilità del processo produttivo”.

Nel contesto di edifici storici (tutelati o no), ci saranno MTTM che non potranno essere applicate per vincoli di salvaguardia da rispettare, eccessivo impatto sull'edificio, mancanza di reversibilità ecc., e altre che lo potranno essere solo dopo valutazioni approfondite.

La performance delle MTTM sui criteri è importante nella valutazione di una MTTM rispetto a un'altra, ma importanti possono essere anche i “pesi” assegnati a questi criteri: i pesi esprimono il punto di vista dell'esperto o del decisore, che può stabilire che un criterio è più importante di un altro. I pesi sono necessari nella valutazione comparativa delle MTTM effettuata con alcune metodologie di analisi multicriteria (Triantaphyllou, 2000). I pesi possono essere calibrati ad hoc quando un insieme di MTTM viene

applicato in un contesto specifico (ad esempio possono essere maggiormente rilevanti i criteri costo e risorse rispetto al tempo di esecuzione, ecc.). I criteri di valutazione sono descritti nella Figura 2.

TABELLA 01 – P. 45

UN MODELLO DI ANALISI DEL RISCHIO PER GLI EVENTI NATURALI E DOVUTI AL CLIMATE CHANGE

Uno degli strumenti principali della metodologia è il modello di analisi del rischio. Esso si basa su un prototipo inizialmente sviluppato nel progetto ResCult², per valutare lo stato dei beni culturali immobili in relazione ai rischi citati in precedenza. Inoltre, considera lo stato degli edifici in relazione alla necessità di adeguamenti legati all'efficientamento energetico e alla problematica delle isole di calore.

Il modello individua alcuni parametri su cui misurare le criticità dell'edificio e del sito, suggerendo le tipologie di interventi possibili (MTM) per ridurre il rischio. Il modello si basa su indicatori di pericolosità e vulnerabilità: ciascun componente edilizio o urbano è associato a un indicatore che assume un valore in relazione alle pericolosità e vulnerabilità individuate. Queste informazioni derivano da "schede di rilevamento", in cui i rilevatori che analizzano le caratteristiche di un edificio attribuiscono i valori di rischio sulla base della conoscenza dell'edificio e del sito in cui si colloca. Valori osservati e stimati degli indicatori confluiscono in una piattaforma di valutazione (implementata in ambiente EXCEL), che fornisce la visualizzazione dello stato di rischio dell'edificio.

Inoltre, la possibilità di derivare degli indici di sintesi di pericolosità e vulnerabilità permette di classificare un edificio con un valore sintetico di rischio. Se gli edifici analizzati sono georeferenziati in un ambiente Gis/Web si potrà avere una panoramica di quelli a maggiore rischio in un determinato territorio, e supportare una pianificazione "regionale" degli interventi.

La formulazione del rischio

La formulazione del rischio adottata in questo modello deriva dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022) in funzione delle componenti pericolosità P, esposizione E, vulnerabilità V, dove la pericolosità è ulteriormente specificata in pericolosità regionale e pericolosità locale:

$$\text{Risk}_{\text{CH}} = f(P_{\text{CH}}, V_{\text{CH}}, E_{\text{CH}}) \quad (1)$$

La Pericolosità P_{CH} è espressione della geografia del rischio (la possibilità che si verifichi un fenomeno con un dato tempo di ritorno e un'intensità massima prevista, e le condizioni del sito in cui l'edificio si trova in relazione alle caratteristiche di rischio); V_{CH} descrive la vulnerabilità di un edificio al fenomeno considerato (impossibilità parziale o totale di contrastare gli effetti del fenomeno); l'esposizione E_{CH} è definita come «La situazione di persone, infrastrutture, edifici, capacità produttive e altre risorse umane tangibili situate in aree pericolose» (UNISDR, 2017) e «La maggiore o minore presenza di attività esposte al rischio, la possibilità di subire danni economici, beni culturali, perdite di vite» (DPC, n.d.).

La Pericolosità P_{CH} è espressione dei parametri:

$$P_{\text{CH}} = f(\text{Rig}, \text{Ril}) \quad (2)$$

relativi alle caratteristiche generali del territorio (Pericolosità regionale

Rig) e del contesto locale in cui è inserito l'edificio (Pericolosità locale Ril). la Vulnerabilità Vu_{CH} è una caratteristica intrinseca del bene considerato. I suoi componenti sono la vulnerabilità strutturale Vu_{str} (la capacità di conservare le proprietà statiche dell'edificio) e la vulnerabilità formale Vu_{for} (la capacità di mantenere gli aspetti peculiari di forma – volumetria, stile, decorazioni, architettura interna ed esterna, e la capacità di essere “sostenibili” rispetto alle prestazioni energetiche richieste, conseguenti a temperature estreme, invernali ed estive).

$$Vu_{CH} = f(Vu_{str}, Vu_{for}) \quad (3)$$

Parametri e indicatori del modello: pericolosità, vulnerabilità, esposizione

Le tipologie di parametri e indicatori del modello sono descritte in sintesi di seguito. Gli indicatori sono descritti nel dettaglio in tabella 02 (Schede descrittive di pericolosità e vulnerabilità).

TABELLA 02 – P. 46

- Incendio

Gli indicatori della pericolosità regionale (Rig) fanno riferimento alle condizioni climatiche, territoriali e metereologiche della regione in cui si trova il sito di interesse. La pericolosità locale (Ril) fa riferimento alle condizioni del contesto urbano e ai sistemi urbani di prevenzione incendi. Le vulnerabilità (Vu_{for} , Vu_{str}) fanno riferimento da un lato all'importanza dell'immobile e dei beni in esso contenuti, dall'altro alla resistenza al fuoco degli elementi (materiali, strutture, ecc.) costituenti l'edificio e ai sistemi di prevenzione e protezione presenti. L'esposizione (E) è caratterizzata dalla tipologia d'uso e distributiva degli ambienti, e dalla presenza e addestramento del personale di emergenza (Aguinagalde *et al.*, 2020; MIC, 1992; Watts, 2009; Torero, 2008, Ministero dell'Interno, 2021; CFFA, 2021).

- Sisma

Gli indicatori della pericolosità regionale fanno riferimento alle condizioni geologiche e sismiche del sito. L'indicatore principale (condizioni sismiche generali) fa riferimento all'intensità sismica statisticamente prevedibile nel sito, ovvero all'accelerazione al suolo. Su questo indicatore è valutata la “vulnerabilità relativa” degli altri indicatori. La pericolosità locale fa riferimento alle condizioni del contesto urbano. La vulnerabilità formale riguarda le caratteristiche planimetriche e altimetriche dell'edificio, la presenza di bucatore, la snellezza delle pareti, lo spessore dei muri, ecc. La vulnerabilità strutturale è relazionata alla capacità degli elementi costruttivi (murature, solai, tetti, archi e volte, scale, fondazioni, ecc.) di contrastare o meno l'azione sismica. Riguarda inoltre elementi di degrado presenti. Indicatori importanti della vulnerabilità strutturale sono quelli relativi alla qualità delle murature; in una versione del modello l'analisi delle murature è effettuata in maniera approfondita, e segue il metodo degli “Indici di Qualità Muraria – IQM” di Borri e De Maria (Borri e De Maria, 2009; 2019). L'esposizione è caratterizzata dalla tipologia d'uso e distributiva degli ambienti (PROCULTHER, 2021; MIBAC, 2017; UNESCO, 2010; Blasi, 2008; Dogliani *et al.*, 1994).

- Inondazione

L'evento riguarda le inondazioni territoriali e urbane (piogge intense,

frane, ecc.) e le inondazioni costiere. Gli indicatori della pericolosità regionale fanno riferimento alle condizioni meteorologiche, idrografiche e geomorfologiche della regione in cui si trova il sito di interesse. La pericolosità locale è riferita alle condizioni del contesto urbano, idrografiche locali e agli elementi presenti di contrasto al rischio idrogeologico. La vulnerabilità formale è relativa ai sistemi di protezione dell'edificio e alle caratteristiche di importanza del bene. La vulnerabilità strutturale riguarda la tipologia costruttiva dell'edificio. L'esposizione è caratterizzata dalla tipologia d'uso e distributiva degli ambienti (ISPRA, 2021; MATE, 2023; Picarelli *et al.*, 2021; IPCC, 2014).

- Isole di calore ed efficientamento energetico

Gli indicatori della pericolosità regionale fanno riferimento alle condizioni meteorologiche e geografiche della regione. La pericolosità locale è riferita alle condizioni del contesto urbano e alle mitigazioni (es. idrica, vegetazionale) eventualmente presenti per contrastare il fenomeno. La vulnerabilità formale riguarda le condizioni dell'edificio e le mitigazioni presenti (es. sui tetti, sulle facciate, la qualità dei serramenti, ecc.). Le vulnerabilità strutturale e impiantistica riguardano i materiali di costruzione dell'edificio e la loro resilienza termica, e i sistemi di climatizzazione presenti. L'esposizione è caratterizzata dalla tipologia d'uso e distributiva degli ambienti e alle caratteristiche sociodemografiche dei soggetti esposti (EPC, 2024; UNESCO, 2019; Huang *et al.*, 2018; Stewart *et al.*, 2021; Musco, 2016).

Intensità dell'evento, vulnerabilità assoluta e vulnerabilità relativa

Nel modello di analisi del rischio è ipotizzata una relazione tra: a) intensità massima (o pericolosità) In_{max} dell'evento (per il sisma, accelerazione massima al suolo A_{max}); b) intensità In_s (accelerazione A_s) attesa in un sito specifico; c) "pericolosità, vulnerabilità, esposizione 'assolute'" di un componente; d) "pericolosità, vulnerabilità, esposizione 'relative'" dello stesso componente, in relazione agli indicatori di riferimento.

In particolare, riguardo al sisma, nella presente ricerca il modello assume come riferimento per In_{max} (A_{max}) l'accelerazione massima potenzialmente prevedibile in Italia (0,300-0,350 g, INGV, 2025).

Le pericolosità e vulnerabilità assolute derivano dalle analisi riportate nelle "Schede di rilevamento". La vulnerabilità relativa è funzione della vulnerabilità "assoluta" Vu , della intensità attesa nel sito In_s e della intensità massima In_{max} ed è definita come:

$$Vu_R = \frac{In_s}{In_{max}} * Vu \quad (4)$$

Se l'intensità attesa In_s (accelerazione massima attesa nel sisma A_s) nel sito è uguale o inferiore all'intensità massima In_{max} (accelerazione massima A_{max}), la vulnerabilità relativa Vu_R sarà compresa tra i valori 0 e 1; viceversa, potrà assumere valori superiori a 1. Per il sisma, la correlazione tra A_s/A_{max} e Vu , per alcuni valori campione, è rappresentata in figura 4, e nella tabella corrispondente. Per la vulnerabilità il modello assume che il valore 1,00 dell'indicatore Vu – stimato dal rilevatore – corrisponda al massimo danneggiamento possibile dell'elemento costruttivo/componente, provocato da una intensità In_s (accelerazione A_s) uguale all'intensità massima In_{max} (accelerazione massima A_{max}): in questa condizione si ipotizza che l'elemento non possa più contribuire alla sua funzione strutturale, poiché ha probabilmente raggiunto o superato lo Stato limite ultimo di collasso (in questo caso $Vu=Vu_R$).

Valori di Vu_r superiori a 1,00 sono possibili quando: 1) l'intensità In_r (accelerazione A_r) dell'evento riscontrata o attesa nel sito è superiore all'intensità massima In_{max} (accelerazione massima di riferimento del modello A_{max}): ad esempio siti in cui un evento sismico può avere un'accelerazione massima attesa maggiore di 0,300-0,350 g, come alcune zone dell'Asia (Turchia, Iran, Tagikistan, Kirghizistan, Kazakistan, Birmania, Nepal, Cina, Giappone) o delle Americhe (California, America Centrale, Dorsale delle Ande); in questo caso la probabilità massima (vicina al 100%) che l'elemento costruttivo (componente) raggiunga o superi lo stato limite ultimo, può essere raggiunta anche da componenti la cui vulnerabilità è inferiore al valore massimo (5); 2) l'elemento costruttivo/componente è talmente degradato/danneggiato per cui si stima che lo stato limite ultimo di collasso possa essere raggiunto per eventi con intensità inferiore all'intensità massima (In_{max}, A_{max}). Essendo i componenti/elementi strutturali spesso integrati e interdipendenti nell'edificio, potrà avvenire che il danneggiamento di alcuni di questi comporti un conseguente danneggiamento – immediato o differito nel tempo – di altri componenti: di ciò si dovrà tenere conto nella valutazione complessiva. Per la valutazione degli interventi di adeguamento e miglioramento di un componente dell'edificio si dovrà tenere conto quindi dei valori di vulnerabilità relativa.

Peraltro, la metodologia qui proposta suggerisce alcune possibili modalità di valutazione degli interventi necessari per adeguare/migliorare le vulnerabilità dei componenti edilizi; il progettista dovrà comunque attenersi in ogni caso alle prescrizioni e normative nazionali (ed eventualmente internazionali) vigenti.

FIGURA 02 – P. 49

In sintesi, il valore relativo degli indicatori di vulnerabilità, di esposizione, e a volte di pericolosità locale, è relazionato ad alcuni indicatori fondamentali: per il sisma l'indicatore di riferimento è l'accelerazione sismica attesa nel sito; per l'inondazione gli indicatori di riferimento si riferiscono alla pericolosità regionale e locale; anche per le isole di calore-efficientamento energetico gli indicatori di riferimento si riferiscono alla pericolosità regionale e locale; per l'incendio gli indicatori di riferimento si riferiscono alla pericolosità locale, alla vulnerabilità formale e all'esposizione.

La piattaforma di elaborazione del modello di analisi del rischio

La Piattaforma di elaborazione del modello di analisi del rischio consente, a partire dai valori di pericolosità e vulnerabilità osservati, il calcolo dei valori di vulnerabilità e pericolosità relativi, delle priorità suggerite per gli interventi di miglioramento/adeguamento, e degli indicatori sintetici di rischio. La Piattaforma di elaborazione è implementata in ambiente EXCEL; nel foglio principale ("User"), sono riportati i valori osservati di pericolosità e vulnerabilità (derivati dalle Schede di rilevamento) e calcolati i corrispondenti valori relativi; il foglio "Accessories" contiene elaborazioni specifiche per il sisma, riguardo la vulnerabilità formale e strutturale; il foglio "Synthetic" è relativo alla sintesi degli indicatori (osservazione sintetica del rischio); nel modello versione 4-IQM è presente inoltre il foglio "IQM" che implementa alcuni indicatori specifici per il sisma relativi alla qualità delle murature, secondo il metodo "Indice di Qualità Muraria" di Borri-De Maria (Borri, De Maria, 2009; 2029).

Il foglio "User" è organizzato in sezioni, quattro macro-righe (tante quanti sono i fenomeni/eventi osservati) e quattro macro-colonne.

Le righe corrispondono alla tipologia di rischio (incendio, sisma, inondazione, isole di calore urbane-efficientamento energetico).

La prima colonna è relativa ai parametri, agli indicatori e ai relativi pesi; la seconda colonna è relativa ai valori “osservati” di pericolosità e vulnerabilità; la terza colonna è relativa ai valori di vulnerabilità relativa; infine, la quarta colonna riguarda le “priorità suggerite” per gli interventi di adeguamento/miglioramento, in base ai pesi degli indicatori.

FIGURA 03 – P. 50

I grafici illustrano nel dettaglio il foglio “User”, per l’evento “sisma”. La prima macro-colonna del foglio (fig. 5A) descrive i parametri (colonna I_1), gli indicatori (colonna I_2) e gli eventuali pesi applicati agli indicatori per definire una loro eventuale “gerarchia” di importanza (colonna I_3).

Le colonne II_1 – II_4 della seconda macro-colonna sono relative ai valori osservati. Nella colonna II_1 viene inserito (tramite un menù) il valore “qualitativo” derivante dalle Schede (*very low, low, medium, high, very high*). La colonna II_2 riporta il valore numerico (da 1 a 5) corrispondente al valore qualitativo. La colonna II_3 normalizza il valore della colonna II_2, nell’intervallo (0 – 1).

La terza macro-colonna del foglio (fig. 03B) riguarda i valori di pericolosità e vulnerabilità “relative”, cioè i valori osservati calibrati in relazione alla reale pericolosità riscontrata nel sito. Nella colonna III_1 (Relative values) è calcolato il valore di “vulnerabilità” o “pericolosità” relativa (Vu_r) del componente/indicatore. Tali pericolosità e vulnerabilità sono il riferimento per l’individuazione della necessità/opportunità di mitigazione/efficientamento di un componente.

La quarta macro-colonna (*Suggested priorities*) è relativa al suggerimento di priorità di intervento di mitigazione nei componenti/indicatori dell’edificio/sito. Nella colonna IV_1 sono indicati i valori di priorità suggerite, ottenuti dal prodotto del valore di vulnerabilità relativa (colonna III_1) per il peso dell’indicatore (colonna I_4); la colonna IV_2 normalizza al valore 1.00 i valori della colonna IV_1.

Le “priorità suggerite” si basano, infatti, oltre che sull’indicatore di vulnerabilità relativa (la “domanda” di mitigazione rivolta alla MTTM), sul peso (importanza) eventualmente stabilito per gli indicatori: elevata vulnerabilità relativa e peso maggiore potranno suggerire alta priorità di intervento per un componente; bassa vulnerabilità relativa e peso minore potranno suggerire bassa priorità di intervento; situazioni di priorità intermedie potranno essere date da vulnerabilità relativa bassa/peso maggiore o vulnerabilità relativa alta/peso minore.

Indici sintetici del rischio

Dai valori degli indicatori è possibile ottenere indici sintetici, relativi ai parametri di pericolosità e vulnerabilità per i vari tipi di eventi. Gli indici di sintesi e relativi istogrammi di riferimento sono presenti nel foglio “Synthetic” della piattaforma di elaborazione.

FIGURA 04 – P. 51

Valori di pericolosità regionali, di pericolosità locale, di vulnerabilità, di esposizione sono calcolati come media, eventualmente pesata, dei valori degli indicatori normalizzati, utilizzando i pesi (W) degli indicatori stessi. Per ciascun evento (sisma, inondazione, incendio, UHI) possono essere calcolati i valori degli indici sintetici di pericolosità regionale e locale; saranno ugualmente calcolati i valori degli indici sintetici di vulnerabilità strutturale, vulnerabilità formale ed esposizione. Indici sintetici di

pericolosità (TH), vulnerabilità ed esposizione (TV) per gli eventi possono essere definiti come medie o somme dei valori di pericolosità e vulnerabilità per ciascun evento.

Una pericolosità complessiva può essere calcolata considerando le singole pericolosità (regionale e locale), per ciascun evento (*Total hazard* – TH_{event}). Una pericolosità regionale o locale multievento può essere calcolata come combinazione (somma) delle pericolosità relative agli eventi. (*Multi hazard* – HM_{multi}). Analogamente, una vulnerabilità complessiva può essere calcolata come media delle singole vulnerabilità (formale, strutturale ed esposizione), per ciascun evento (*Total vulnerability* – TV_{event}). Una vulnerabilità formale, strutturale, esposizione multievento può essere calcolata come combinazione (somma) delle vulnerabilità relative a tutti gli eventi (*Multi vulnerability* – HV_{multi}).

VALUTAZIONE MULTICRITERIA DI METODOLOGIE, TECNOLOGIE, TECNICHE, MATERIALI (MTTM)

Le MTTM introdotte in precedenza possono essere sottoposte a un preliminare screening, per individuare quelle più promettenti, che possono orientare il progettista nella scelta delle opzioni da applicare.

Successivamente, specifiche valutazioni sull'edificio e il contesto potranno ulteriormente selezionare le azioni opportune, considerando anche la mitigazione di più problematiche (es. sismica + efficientamento energetico) suggerendo una filiera di cantiere coerente ed ottimizzata.

La valutazione delle opzioni può essere effettuata con analisi multicriteria. L'analisi multicriteria (AMC, MCDA-*Multi Criteria Decision Analysis*) è una disciplina della ricerca operativa⁴ (Lucertini *et al.*, 1995) che riguarda i processi decisionali, ed è applicata in molti e differenti contesti come economia, politica, ingegneria, medicina, architettura e pianificazione (Belton, 2002; Figueira *et al.*, 2016; Köksalan *et al.*, 2011). Con l'analisi multicriteria si possono comprendere in un unico procedimento valutativo criteri di carattere economico e criteri extra economici. Strutturare bene i problemi complessi e considerare criteri eterogenei porta in genere a decisioni più adeguate, condivisibili, raffrontabili e quindi migliori. Per questi motivi, l'analisi multicriteria è uno strumento adeguato alla valutazione comparata delle MTTM che sono state identificate e analizzate nella ricerca,

Nell'analisi multicriteria viene definita una "matrice di valutazione" avente righe corrispondenti ai criteri considerati (C_j) e colonne corrispondenti alle opzioni da considerare ($MTTM_i$); i valori della matrice (V_{ij}) rappresentano le "performance" o "prestazioni" dell'opzione $MTTM_i$ rispetto al criterio C_j (fig. 05A). Ad ogni criterio C_j può essere attribuito un peso w_j che ne indica l'importanza relativa rispetto agli altri criteri. Non tutti i metodi di analisi multicriteria richiedono di assegnare pesi ai criteri. Nella presente ricerca si è ritenuto opportuno considerare metodi che includessero i pesi, in quanto, per il contesto e la tipologia degli stakeholders coinvolti, ciò appariva significativo.

FIGURA 05 – P. 52

RELAZIONE DELLE MTTM CON GLI INDICATORI DEL MODELLO DI ANALISI DEL RISCHIO

La relazione tra gli indicatori del modello di analisi del rischio e specifici insiemi di MTTM, per ciascun evento, consente di individuare quali di queste opzioni possono mitigare, adattare e/o migliorare le pericolosità e le vulnerabilità specifici dell'edificio o del sito (fig. 05B).

Le MTTM sono solitamente applicabili agli indicatori di pericolosità locale o vulnerabilità strutturale. Raramente possono essere applicate a indicatori di pericolosità regionale, in quanto tali indicatori sono influenzati dagli effetti dell'evento su una scala che non può essere attualmente controllata dall'azione umana (ad esempio per i terremoti: accelerazioni, conformazioni del suolo o del sottosuolo, ecc.; per le alluvioni: condizioni idrogeologiche o meteorologiche del sito; per le isole di calore urbane: caratteristiche climatiche, ecc.). Alcune MTTM possono però essere applicate per intervenire sulla mitigazione delle pericolosità regionali (ad esempio per le alluvioni: azioni sull'idrografia del territorio, ecc.).

Le vulnerabilità formali (che riguardano le conformazioni architettoniche degli edifici o le conformazioni urbane/ambientali dei siti) non sono solitamente modificabili, soprattutto quando si opera in centri storici e su edifici tutelati/classificati. Le vulnerabilità strutturali possono essere invece spesso oggetto di intervento attraverso appropriate MTTM, insieme all'uso di materiali innovativi, preferibilmente caratterizzati da basso impatto e maggiore sostenibilità.

Con ciascun insieme composto da almeno due MTTM (evidenziato in tratteggio in fig. 05B) è possibile definire una matrice di valutazione multicriteria (*Multi Criteria Analysis Matrix*, d'ora in avanti MCAM) per un determinato componente/indicatore.

Se nessuna MTTM della matrice MCAM singolarmente non riesce a soddisfare alla domanda di miglioramento del componente dell'edificio o sito, potrebbe essere opportuno far intervenire più MTTM – in parallelo o in sequenza, allo scopo di avvicinarsi il più possibile al risultato desiderato. Considerando inoltre la necessità di interventi di mitigazione su più componenti di un edificio o sito, potranno essere considerate MTTM che vengono anch'esse applicate in parallelo o in sequenza. È naturalmente di interesse – in un'ottica di ottimizzazione dei costi e dei tempi complessivi – che si possano attivare filiere in cui la maggior parte delle MTTM adottate possano intervenire in parallelo.

È anche importante la possibilità di poter eseguire nello stesso cantiere (o in parti di cantiere contigue), interventi per la mitigazione di diversi eventi: ad esempio l'esecuzione di un efficientamento sismico assieme all'efficientamento energetico di un edificio.

UN'APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA. EFFICIENTAMENTO ENERGETICO DEI SERRAMENTI IN UN EDIFICIO STORICO

Si illustra di seguito l'applicazione della metodologia, con un test di individuazione e valutazione delle soluzioni più appropriate per l'efficientamento energetico dei serramenti in un edificio storico.

L'edificio campione, sottoposto a vincolo di tutela ex D.Lgs 42/2004 (MiBAC, 2004), è caratterizzato da originari infissi lignei a doppia anta, privi di vetrocamera.

Dall'analisi effettuata con il modello di rischio, si è rilevata nell'edificio, tra le altre, una "vulnerabilità formale" elevata nell'indicatore "Mitigazione dell'edificio, facciate" per l'evento "Isole di Calore Urbane – Efficientamento energetico", per cui si rende necessario il miglioramento.

Questo tipo di intervento rappresenta una delle sfide più frequenti e complesse nella riqualificazione sostenibile del patrimonio costruito, poiché coinvolge contemporaneamente aspetti di prestazione energetica, compatibilità materica e formale, reversibilità e vincoli di tutela.

Nel test si valuteranno le MTTM con i criteri appartenenti alle categorie "applicabilità e impatti sull'edificio e sul sito" e "costi e logistica di cantiere".

Le MTTM valutate appartengono alle tipologie di intervento “Sostituzione serramenti e messa in opera di vetrate” e “Applicazione pellicole e schermi”, definite nelle “MIC. Linee di indirizzo per il miglioramento dell’efficienza energetica nel patrimonio culturale” (MIC, 2015).

Gli interventi considerati nella valutazione sono: “sostituzione dei serramenti con modelli ad alta prestazione energetica” (In. 07); “messa in opera, sul lato interno delle ante mobili, di una seconda anta vetrata” (In. 09); “isolamento e tenuta all’aria del telaio” (In. 11); “meccanizzazione del serramento esistente o del nuovo serramento” (In. 13); “applicazione al vetro di pellicole a controllo solare” (In. 19); “installazione di schermi interni” (In. 20); le prestazioni di queste MTTM riguardo ai criteri già menzionati sono state definite nell’indagine preliminare sulle MTTM.

I pesi assegnati ai criteri per questo caso studio riflettono un profilo valutativo del decisore/progettista orientato a considerare: per i criteri “applicabilità e impatti” come prioritari, oltre all’efficacia, la minimizzazione dell’impatto sulla fabbrica e la massimizzazione della durabilità dell’intervento; per i criteri “costi e logistica di cantiere” come prioritari la minimizzazione dei costi di esecuzione, la minimizzazione della limitazione d’uso dell’edificio, la minimizzazione dei costi di manutenzione futuri.

Per l’analisi multicriteria delle matrici MCAM si è optato per la metodologia ELECTRE. I metodi della famiglia ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*, “eliminazione e scelta che esprimono la realtà”, Roy, 1968, Maystre *et al.*, 1994, Rogers, 2000) nascono dalla constatazione che rigorosi assiomi matematici sono spesso inadatti a descrivere una realtà complessa come quella dei processi decisionali, per cui risulta più utile un approccio il più possibile aderente al buon senso delle scelte reali. I metodi ELECTRE si basano su un confronto a coppie di tutte le opzioni, per determinare quali di queste ne surclassano altre.

Il surclassamento (*outranking*) di ELECTRE si basa sul principio concordanza/discordanza, ossia sulla verifica dell’esistenza di una concordanza di ragioni/criteri a favore di una opzione rispetto ad un’altra (condizione di concordanza) e sul controllo che non esistano situazioni (ragioni/criteri) di forte discordanza tra le valutazioni in grado di mettere in discussione la concordanza appena testata (Roy, 1968).

Nella metodologia ELECTRE è previsto il controllo della valutazione con alcuni parametri, tra cui le “soglie” di “concordanza” e di “discordanza”: tali soglie sono fissate dal decisore e misurano rispettivamente il grado di “accordo” e “disaccordo” tra le opzioni rispetto ai criteri. Una soglia di concordanza più alta implica un criterio di valutazione più stringente, richiedendo un maggiore accordo tra le opzioni. Una soglia di discordanza più alta implica un criterio di valutazione meno rigoroso, permettendo un maggiore disaccordo su alcuni aspetti.

Nel test è stato utilizzato il modello ELECTRE I (Roy, 1968), in una variante elaborata dall’autore del presente contributo. Questo modello è relativamente semplice da utilizzare, rispetto agli altri modelli della famiglia⁵, ma sufficientemente efficace; sebbene sia indicato per l’individuazione delle opzioni più promettenti, qui verrà utilizzato, come illustrato più avanti, anche per individuare un “pseudo-ordinamento” tra le diverse MTTM.

Nelle matrici di valutazione le prestazioni delle MTTM rispetto ai criteri (indicate in una scala di valori, dalla minore performance (*) alla maggiore performance (*****) sono espresse in valore “assoluto”: nei criteri di tipo “beneficio” il valore maggiore (prestazione maggiore) corrisponde a un beneficio maggiore, mentre nei criteri di tipo “costo” il valore maggiore (prestazione maggiore) corrisponde a un costo minore.

Valutazione delle MTTM per i criteri di “applicabilità e impatti”

La matrice di valutazione sui criteri “applicabilità e impatti” è riportata in figura 06A.

FIGURA 06 – P. 54

Il risultato della valutazione (fig. 06B) evidenzia come le opzioni più promettenti siano “seconda anta vetrata” (In. 09) e “isolamento del telaio” (In. 11), mentre la “sostituzione dei serramenti” (In. 07) appare la meno performante tra tutte.

Nella figura 06B, al di sotto dell’istogramma, è riportato il “grafo di dominanza”, che evidenzia il “surclassamento” di un’opzione su un’altra, con punteggi totali per ciascuna opzione che esprimono il bilancio dominata-dominata. Dal grafo emerge che l’opzione “seconda anta vetrata” è “preferibile” alle altre opzioni tranne “isolamento telaio”; quest’ultima è preferibile alle opzioni “meccanizzazione serramento” e “sostituzione serramento”; la “peggiore” opzione è “sostituzione serramento”, che risulta meno preferibile rispetto a tutte le altre opzioni.

Nonostante ELECTRE I sia utilizzato per individuare un sottoinsieme di opzioni non dominate, e non un ordinamento (parziale o completo), come accade invece in ELECTRE II e III, in questo test viene costruito un “pseudo-ordinamento” (evidenziato nell’istogramma in figura) utilizzando i punteggi totali delle opzioni indicati nel grafo di surclassamento. Tale pseudo-ordinamento può essere utile ai valutatori per osservare sinteticamente il grado di preferibilità delle opzioni, e suggerire conseguentemente le scelte.

Valutazione delle MTTM per i criteri di “logistica di cantiere e costi”

La matrice di valutazione sui criteri “logistica di cantiere e costi” è riportata in figura 07A.

FIGURA 07 – P. 55

Il risultato della valutazione evidenzia come le opzioni più promettenti per questa tipologia di criteri siano “isolamento del telaio” (In. 11) e “installazione di schermi interni” (In. 20), mentre la “meccanizzazione del serramento” (In. 13) appare la meno performante (fig. 07B) tra tutte.

Nella figura 07B, al di sotto della graduatoria, è riportato anche qui il “grafo di dominanza”, che evidenzia il “surclassamento” delle opzioni, con i relativi punteggi: dal grafo emerge che l’opzione “isolamento del telaio” è “preferibile” rispetto a tre opzioni, ma non ad altre due; “installazione schermi interni” è “preferibile” a tre opzioni ma meno “preferibile” di “isolamento telaio”; l’opzione meno “preferibile” tra tutte è “meccanizzazione serramento”. Da osservare che vi sono situazioni in cui non è definibile il surclassamento certo di un’opzione su un’altra, cioè se una sia preferibile o meno all’altra: ciò accade per le coppie “meccanizzazione serramento”/“applicazione pellicole” e “seconda anta vetrata”/“applicazione pellicole”. Il motivo di tale “incertezza” può derivare dai pesi definiti ma anche dalle soglie di concordanza e discordanza del surclassamento citate in precedenza. Una variazione di tali soglie potrà eventualmente precisare meglio il surclassamento tra tali opzioni.

Da osservare inoltre che l’opzione “Installazione schermi interni”, sebbene abbia un punteggio più alto di “Sostituzione serramenti”, è dominata (peggiore) dall’opzione “Isolamento telaio”: di ciò si dovrà tenere conto nella possibile scelta finale.

Confrontando i risultati delle elaborazioni per le due categorie di criteri,

si può osservare che alcune opzioni appaiono “abbastanza” preferibili per entrambe le tipologie di criteri (es. “isolamento telaio” e, in parte, “installazione di schermi interni”); per altre c’è un disaccordo, anche molto evidente (es. “sostituzione serramenti”, “seconda anta vetrata”); altre sono decisamente “meno preferibili” per entrambe le tipologie di criteri (es. “meccanizzazione serramento”, “applicazione pellicole”).

Per valutare l’affidabilità dei risultati dell’analisi e individuare con maggiore precisione quali opzioni di intervento siano in definitiva le più promettenti, è possibile seguire alcuni approcci:

1. Effettuare un’ulteriore analisi multicriteria considerando come prestazioni delle opzioni il ranking (punteggio) derivato dalle due analisi precedenti, e come criteri di valutazione le classi “applicabilità e impatti” e “logistica di cantiere e costi”: si definisce in questo modo una matrice di sei opzioni per due criteri, su cui viene eseguita una nuova analisi.
2. Effettuare un’analisi di “sensibilità” delle due valutazioni, modificando le soglie di concordanza e discordanza. In questo modo si può osservare se, modificando, anche di poco, tali soglie, i surclassamenti e le graduatorie cambiano di poco o in modo sostanziale: nel secondo caso il modello complessivo appare poco “robusto”, cioè potrebbe non essere stato correttamente impostato dal valutatore: potrebbe essere necessario un ragionamento ulteriore sulla attribuzione dei pesi ai criteri, eventualmente ampliando la platea degli stakeholders.
3. Effettuare l’analisi multicriteria adottando metodi più indicati per l’ordinamento delle opzioni (come ELECTRE II, ordinamento parziale o ELECTRE III, ordinamento completo).
4. Effettuare l’analisi multicriteria con ELECTRE IV, che non prevede l’assegnazione di pesi ai criteri, per osservare come e quanto il ranking sia sensibile all’introduzione dei pesi attribuiti dagli stakeholders.
5. Effettuare l’analisi multicriteria con altre metodologie che propongano ordinamenti tra le opzioni (es. PROMETHEE, AHP, TOPSIS, MAUT/UTA, REGIME, ecc.).
6. Infine, potrebbe essere anche importante verificare i valori delle prestazioni delle MTTM: potrebbe accadere cioè che nel contesto specifico alcune prestazioni delle MTTM possano variare in modo significativo: ad esempio, potrebbe aumentare il costo dell’intervento, la complessità di cantiere o la tempistica di esecuzione, per edifici in siti di difficile accessibilità; potrebbe diminuire l’efficacia della MTTM, per le condizioni di particolare degrado dell’edificio; potrebbero esserci vincoli di salvaguardia tali da non tollerare anche minimi impatti sulla fabbrica originaria.

In conclusione, la metodologia presentata in questa ricerca considera l’intero processo di analisi e interventi sulla fabbrica storica come uno speditivo, efficace, oggettivo e scientificamente fondato strumento di “aiuto alle decisioni” che accompagna e supporta il progettista e/o il committente, permettendo un confronto e una decisione finale tra più attori. Ciò può essere inoltre utile, quando si renda necessaria una analisi e pianificazione della riqualificazione di un parco consistente di edifici storici (pubblici ma anche privati) in un centro urbano, ove occorra valutare, in base a rischi, stato di conservazione, vincoli, priorità, costi, ecc. una gerarchia di intervento tra i diversi edifici. Tanto più utile in periodi in cui le disponibilità economiche sono limitate, e quindi occorre decidere in maniera ponderata ciò su cui si deve intervenire prima e ciò su cui si può intervenire in un secondo momento.

Riferimenti bibliografici

- Aboulnaga, M., Trombadore, A., Mostafa, M., et al. (2023) *Livable cities: Urban heat islands mitigation for climate change adaptation*. Cham: Springer.
- Aguinagalde, A., Bontempi, F., Petrini, F. (2020) 'Un'impostazione del rischio incendio nelle costruzioni storiche: caso studio Duomo di Modena' in *INGENIO*, 21 April 2020. Disponibile su: <https://www.ingenio-web.it/articoli/una-impostazione-del-rischio-incendio-nelle-costruzioni-storiche/> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Belton, V., Stewart, T.J. (2002) *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Boston, MA: Springer.
- Blasi, C. (2008) *Architettura storica e terremoti*. Milano: Wolters Kluwer Italia.
- Borri, A. (2009) *Indice di qualità muraria (IQM)*. Disponibile su: <https://docenti.ing.unipi.it/~a005843/Consolidamento%202016-17/bibliografia/Borri%20-%20Indice%20di%20qualità%20muraria.pdf> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Borri, A., De Maria, A. (2019) *Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature alla luce della circolare n. 7/2019*. Disponibile su: <https://www.aedes.it/documents/20142/305149/metodo-iqm-borri-anidis-2019.pdf/140a93b0-62cb-96ca-39b1-339230e0c3c9> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Comitato Europeo di Normazione (CEN) (2004) *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings (EN 1998-1:2004)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Comitato Europeo di Normazione (CEN) (2005) *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (EN 1998-3:2005)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Comitato Europeo di Normazione (CEN) (2006) *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects (EN 1998-5:2006)*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Confederazione delle Associazioni Europee per la Protezione Antincendi – Europa (CFPA-Europa) (2021) *Basic Principles of Fire Safety of Historic Buildings*. CFPA-E Guideline, 30. Disponibile su: https://cfpa-eeu/app/uploads/2022/05/CFPA_E_Guideline_No_30_2021_F.pdf (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Doglioni, F., Moretti, A., Petrini, V. (1994) *Le chiese e il terremoto*. Trieste: LINT Editoriale Associati.
- Dipartimento della Protezione Civile (DPC) (n.d.) *Esposizione. Rischio sismico – Approfondimenti*. Disponibile su: <https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/sismico/attivita/esposizione/> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea (2024) *Directive (EU) 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings*. Disponibile su: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ.L_2024.01275 (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Figueira, J., Greco, S., Ehtgott, M. (a cura di) (2016) *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. New York: Springer.
- Huang, Q., Lu, Y. (2018) 'Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis', in *Theoretical and Applied Climatology*, 131, pp. 1055-1067. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-2025-1>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014) *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponibile su: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Front-MatterA_FINAL.pdf (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Disponibile su: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) (2021) *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*. Disponibile su: https://www.isprambiente.gov.it/files/2022/pubblicazioni/rapporti/rapporto_dissesto_idrogeologico_italia_ispra_356_2021_finale_web.pdf (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (2025) *Archivi e banche dati. INGV – Risorse e Servizi*. Disponibile su: <https://www.ingv.it/risorse-e-servizi/archivi-e-banche-dati> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC) (2004) *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 – Codice dei beni culturali e del paesaggio*. Disponibile su: <https://www.normattiva.it/eli/id/2004/02/24/004G0066/CONSOLIDATED/20200914> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- Köksalan, M., Wallenius, J., Zionts, S. (2011) *Multiple Criteria Decision Making: From Early History to the 21st Century*. Singapore e Hackensack, NJ: World Scientific.
- Lagomarsino, S., Ugolini, P. (2004) 'Rischio sismico, territorio e centri storici', in *Atti del Convegno Nazionale, Sanremo (IM)*, 2-3 luglio 2004. Milano: FrancoAngeli.
- Lucertini, M., Paruccini, M., Tieghi, G. (1995) *Storia, metodologia e modelli della ricerca operativa*. Bologna: Il Mulino.
- Maystre L.Y., Pictet J., Simos J., (1994) *Méthodes multicritères ELECTRE*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo (MiBACT) (2015) *Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale. Architettura, centri e nuclei storici e urbani*. Roma: MiBACT. Disponibile su: <https://www.soprintendenzapdve.beniculturali.it/la-soprintendenza-informa/atti-di-indirizzo/linee-guida-di-indirizzo-per-il-miglioramento-dellefficienza-energetica-nel-patrimonio-culturale/> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).
- Ministero dell'Interno, Dipartimento dei Vigili del Fuoco, del Soccorso Pubblico e della Difesa Civile (2021) *Codice di prevenzione incendi: testo coordinato dell'allegato I del DM 3 agosto 2015*. Disponibile su: https://www.vigilfuoco.it/sites/default/files/2022-10/COORD_DM_03_08_2015_Codice_Prevenzione_Incendi.pdf (Ultimo accesso 1 settembre 2025).
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2023) *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)*. Roma: MASE. Disponibile su: <https://www.mase.gov.it/portale/web/guest/-/clima-approvato-il-piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali (1992) *Regolamento recante norme di sicurezza antincendio per gli edifici di interesse storico-artistico destinati a musei, archivi e biblioteche. D.M. 20 maggio 1992, n. 569*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. Presidenza del Consiglio dei Ministri (PCM) (2011) *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 47, 26 febbraio, Supplemento Ordinario n. 54.

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) (2008) *Decreto 14 gennaio 2008: Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*. Gazzetta Ufficiale, Serie Generale n.29, 04-02-2008 – Suppl. Ordinario n. 30. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2008/02/04/08A00368/sg> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT) (2018) *Decreto 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*. Gazzetta Ufficiale, Serie Generale n.42, 20-02-2018 – Suppl. Ordinario n. 8. Disponibile su: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2018/2/20/18A00716/sg> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Musco, F. (2016) *Counteracting urban heat island effects in a global climate change scenario*. Cham: Springer. Disponibile su: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-10425-6> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Picarelli, L., Lacasse, S., Soudos, K. (2021) 'The impact of climate change on landslide hazard and risk', in Sassa, K., Mikoš, M. Yin, Y. (a cura di) *Understanding and reducing landslide disaster risk*. Cham: Springer, pp. 131-141. doi:10.1007/978-3-030-60196-6_6.

PROCLUTHER (2021) *Protecting cultural heritage from the consequences of disasters: Key elements of a European methodology to address the protection of cultural heritage during emergencies*. Disponibile su: <https://www.procluther.eu/wp-content/uploads/2022/06/PROCLUTHER-Methodology.pdf> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

ReLUIS (2025) Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e Strutturale. Disponibile su: <https://www.reluis.it/> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Rogers, M., Bruen, M., Maystre, L-Y., (2000) *ELECTRE and Decision Support. Methods and Applications in Engineering and Infrastructure Investment*. Berlin: Springer.

Roy, B., (1968) 'Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE', in *La Revue d'Informatique et de Recherche Opérationnelle (RIRO)*, 8, 1968.

Stewart, I.D., Mills, G. (2021) *The urban heat island*. Amsterdam: Elsevier.

Torero, J.L. (2008). *Fire safety of historical buildings: Principles and methodological approach*. Princeton: Center for Energy and the Environment. Disponibile su: <https://cefc.princeton.edu/sites/g/files/toruqf1071/files/reading-1.pdf> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Triantaphyllou, E. (2000) *Multi-criteria decision making: a comparative study*. Berlin: Springer.

UNESCO (2010) *Managing disaster risks for World Heritage*. Disponibile su: <https://whc.unesco.org/en/managing-disaster-risks/> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

UNESCO (2019) *Sviluppo urbano sostenibile*. Disponibile su: <https://www.unesco.it/it/temi-in-evidenza/cultura/sviluppo-urbano-sostenibile/> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) (2017) *UNISDR Terminology: Basic terms of disaster risk reduction*. Disponibile su: www.unisdr.org/we/inform/terminology (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

CORILA (2021, 2022) *Programma di ricerca scientifica per una laguna regolata*. Disponibile su: https://venezia2021.corila.it/home_ve2021/ (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Watts, J.M. (2009) *Fire safety in historic buildings*. Washington, DC: National Trust for Historic Preservation. Disponibile su: <https://savingplaces.org/files/fire-safety-and-historic-buildings> (Ultimo accesso 1 settembre 2025).

Note

- 1** Sono state prese in considerazione, tra le altre, le fonti: *Linee guida per il miglioramento dell'efficienza energetica nei beni culturali* del Ministero per i beni e le attività culturali italiano (MIC, 2015); i risultati dell'Attività 1.3 (Innovative technologies and operating methodologies) del progetto PNRR, INEST-*Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 – City, Architecture, Sustainable Design, RT2 – Heritage, recovery, conservation*, il Programma di ricerca "Venezia2021" (CORILA, 2021; 2022), gli Eurocodici (CEN, 2004, 2005, 2006, Eurocode 8), le Norme Tecniche per le Costruzioni del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti italiano e le relative linee guida applicative (MIT, 2008, 2018) e le linee guida sviluppate da esperti (MIBAC, 2017; ReLUIS, 2025).
- 2** ResCult – DG ECHO 2017-2018. Increasing Resilience of Cultural heritage: a supporting decision tool for the safeguarding of cultural assets. www.rescult.eu.
- 3** Per valutare la pericolosità "P" si considera l'ubicazione del bene in relazione a una "geografia" di rischio". Eventi idrogeologici possono essere riferiti a una mappa del rischio idrogeologico, ma anche all'area attorno all'edificio. Gli eventi sismici possono essere correlati a una mappa di pericolosità sismica e alla geologia del contesto. L'incendio può tenere conto della posizione geografica e delle condizioni del contesto. Le Isole di Calore Urbane (UHI) sono commisurate alle temperature, le conformazioni del suolo urbano, le condizioni di ombreggiamento, riflettanza, ecc.
- 4** La ricerca operativa (RO) è una disciplina scientifica che sviluppa e applica modelli matematici, statistici e computazionali per supportare i processi decisionali complessi. Nata in ambito militare durante la Seconda Guerra Mondiale, si è poi diffusa in vari settori civili (Ingegneria, economia, logistica, gestione ambientale, beni culturali). L'obiettivo è fornire soluzioni ottimali o soddisfacenti a problemi caratterizzati da risorse limitate, vincoli multipli e criteri spesso conflittuali, attraverso strumenti come l'ottimizzazione, la teoria dei giochi, le simulazioni, le reti di flusso e i metodi multicriteri.
- 5** I modelli della famiglia ELECTRE sono stati sviluppati dagli anni '60 agli anni '90. ELECTRE I (1968) è un metodo di selezione. Confronta le alternative a coppie attraverso indici di concordanza e soglie di veto; individua un sottoinsieme di soluzioni "non dominate" da proporre al decisore. ELECTRE II (1970) è un metodo di ordinamento parziale maggiormente complesso rispetto ad ELECTRE I; integra procedure iterative di confronto per distinguere alternative "più forti" e "più deboli"; utile per gerarchie parziali piuttosto che un ranking completo. ELECTRE III (1978) è un metodo di ordinamento completo. Introduce soglie di indifferenza, preferenza e veto, trattando incertezza e imprecisione; produce un ordinamento complessivo delle alternative. ELECTRE IV (1986) è simile a ELECTRE III ma senza attribuzione di pesi ai criteri; adatto quando i pesi non sono disponibili o non condivisi, fornendo comunque un ordinamento. ELECTRE IS (1994) è un'evoluzione di ELECTRE I. Più flessibile nella definizione di soglie di indifferenza/preferenza, consente selezioni robuste e meno sensibili a piccole variazioni dei dati. ELECTRE TRI (1992) è un metodo di classificazione. Assegna ogni alternativa a categorie predefinite (es. livelli di rischio o priorità), usando profili limite e soglie di preferenza/veto.

Critero	Descrizione	Beneficio / Costo	Tipologia evento
Efficacia, applicabilità, impatti			
Efficacia	Capacità della MTTM di rispondere efficacemente alla richiesta di mitigazione della vulnerabilità di un componente/elemento dell'edificio o urbano	beneficio	tutti
Performance ambientale	Requisiti della MTTM analizzati nell'attività 1.3 in merito alla risposta a target, azioni, obiettivi, sfide	beneficio	UHI – efficientamento energetico
Applicabilità	Applicabilità della MTTM in diversi contesti e a diverse scale di intervento	beneficio	tutti
Sostenibilità ambientale	Caratteristiche di sostenibilità nell'applicazione della MTTM relativamente all'impatto sull'ambiente e sull'ecosistema dell'edificio/sito	beneficio	tutti
Reversibilità	Possibilità che la rimozione dell'intervento consenta il ritorno alla precedente configurazione dell'edificio/sito	beneficio	tutti
Impatto formale e costruttivo sull'edificio/sito	L'applicazione della MTTM può modificare le caratteristiche originali (formali, strutturali, ecc.) dell'edificio/sito e dei suoi elementi componenti. Ciò può essere accettabile o meno.	costo	tutti
Durabilità	L'intervento effettuato con la MTTM può essere più o meno duraturo. Questo può influenzare le problematiche di eventuali manutenzioni future.	beneficio	tutti
Qualità della riqualificazione urbana	L'adozione della MTTM può portare come ulteriore beneficio un miglioramento della qualità della riqualificazione urbana del sito o dell'intorno dell'edificio.	beneficio	UHI – efficientamento energetico, inondazione
Numerosità SDGs	Collegamenti con gli Obiettivi di sviluppo sostenibile (SDG), un insieme di 17 obiettivi interconnessi definiti dalle Nazioni Unite come strategia "per raggiungere un futuro migliore e più sostenibile per tutti".	beneficio	UHI – efficientamento energetico, inondazione
Costi e logistica di cantiere			
Costo economico	Il costo medio (effettivo o stimato) dell'applicazione della MTTM può essere definito in valori numerici (ad esempio euro per unità di produzione/ implementazione) o in misura qualitativa.	costo	tutti
Complessità del cantiere	Necessità di impegnare un numero maggiore o minore di risorse umane, tecnologiche e di gestione del cantiere.	costo	tutti
Disponibilità sul mercato	Le MTTM possono essere immediatamente disponibili o richiedere tempi di attesa.	beneficio	tutti
Limitazione dell'uso dell'edificio	Durante i lavori di miglioramento o conservazione/ restauro, le funzionalità d'uso dell'edificio/sito possono essere ridotte o annullate. Le migliori MTTM sono quelle che consentono la possibilità che l'edificio continui a svolgere la sua funzione.	costo	tutti
Tempo di esecuzione	Il tempo di esecuzione per l'applicazione della MTTM nel cantiere può variare. Tale criterio è anche correlato alla possibile limitazione dell'uso dell'edificio.	costo	tutti
Costi di manutenzione dell'intervento	L'intervento potrebbe comportare costi aggiuntivi post-operativi per manutenzione ordinaria e straordinaria.	costo	tutti
Regionalità	Possibilità di avere la MTTM disponibile in prossimità del cantiere	beneficio	tutti
Necessità di interventi integrativi	La necessità di realizzare ulteriori interventi a supporto della applicazione.	costo	tutti
Processo produttivo dei materiali e componenti			
Grado di innovazione	Innovazioni nei metodi di produzione, nelle tecniche e nelle materie prime.	beneficio	tutti
Sostenibilità	Sostenibilità nel processo produttivo della MTTM come impatto sull'ambiente e sull'ecosistema.	beneficio	tutti

TABELLA 01

Criteria di valutazione delle Metodologie, Tecnologie, Tecniche, Materiali.
E. Rinaldi, 2025.

Tipologia del parametro	Parametro	Componente / Indicatore	
Pericolosità	Pericolosità regionale	Condizioni climatiche	
		Condizioni idrologiche	
		Condizioni territoriali	
		Condizioni metereologiche	
Vulnerabilità	Pericolosità locale	Condizioni del contesto architettonico-urbano	
		Sistemi urbani di prevenzione degli incendi	
		Elementi non strutturali resistenti al fuoco	
		Elementi di importanza culturale a rischio incendio	
Vulnerabilità	Vulnerabilità formale	Sistemi di prevenzione antincendio dell'edificio	
		Elementi antincendio	
		Vulnerabilità strutturale	Materiale della struttura dell'edificio
			Tipologia funzionale
Esposizione	Vulnerabilità strutturale	Personale per interventi in emergenza	
		Tipologia distributiva	

02A. Parametri e componenti delle schede di rilevazione. Incendio

Tipologia del parametro	Parametro	Componente/Indicatore		
Pericolosità	Pericolosità regionale	Condizioni sismiche generali		
		Condizioni sismiche locali (storia sismica)		
		Condizioni geologiche		
		Condizioni del contest architettonico e urbano		
Vulnerabilità	Pericolosità locale	Elementi non strutturali		
		Configurazione planimetrica		
		Configurazione altimetrica		
		Volumi aggregati		
	Vulnerabilità formale	Contesto architettonico	Collegamenti tra gli elementi strutturali	
			Strutture orizzontali (solai)	
			Tipologia strutturale	
			Materiali della struttura	
			Qualità della muratura	
			Tetti	
Vulnerabilità	Vulnerabilità strutturale	Archi e volte		
		Fondazioni		
		Elementi resistenti verticali		
		Scale		
		Degrado		
		Degrado da sisma recente		
		Esposizione	Vulnerabilità strutturale	Tipologia funzionale
				Tipologia distributiva

02B. Parametri e componenti delle schede di rilevazione. Terremoto

TABELLA 02

Modello di analisi del rischio.

Schede descrittive di pericolosità e vulnerabilità.

E. Rinaldi, 2025.

Tipologia del parametro	Parametro	Componente/Indicatore
Pericolosità	Pericolosità regionale	Condizioni metereologiche
		Condizioni geomorfologiche
		Condizioni idrografiche regionali
	Pericolosità locale	Condizioni idrografiche locali
		Contrasto del rischio
		Condizioni del contest architettonico-urbano
Vulnerabilità	Vulnerabilità formale	Condizioni territoriali locali
		Sistemi di protezione dell'edificio
	Vulnerabilità strutturale	Oggetti, arredi, di importanza culturale
Esposizione		Tipologia strutturale
		Tipologia funzionale
		Tipologia distributiva

02C. Parametri e componenti delle schede di rilevazione. Inondazione

Tipologia del parametro	Parametro	Componente/Indicatore
Pericolosità	Pericolosità regionale	Condizione geografica. Latitudine
		Condizione geografica. Altitudine
		Condizione geografica. Morphologia
		Condizioni climatiche
		Condizioni atmosferiche
		Presenza di inquinamento ambientale
	Pericolosità locale	Condizioni atmosferiche locali
		Riflettanza / albedo delle superfici urbane
		Permeabilità delle superfici urbane
		Conducibilità termica delle superfici urbane
		Condizioni del contesto architettonico. Densità degli edifici
		Condizioni del contesto architettonico. Mitigazione idrica
Vulnerabilità	Vulnerabilità formale	Condizioni del contesto architettonico. Mitigazione vegetazionale
		Condizioni del contesto architettonico. Sky-view factor
		Conformazione dell'edificio
		Esposizione geografica dell'edificio
		Albedo dell'edificio. Tetti
		Albedo dell'edificio. Facciate
	Vulnerabilità strutturale e impiantistica	Elementi di mitigazione dell'edificio. Facciate
		Elementi di mitigazione dell'edificio. Tetti
		Elementi fisici di facciata per la mitigazione
		Rapporto altezza edificio/larghezza superficie stradale
		Sistemi di climatizzazione presenti e loro efficienza
		Involucro dell'edificio e sua efficienza
Esposizione		Materiali di costruzione dell'edificio e loro resilienza termica
		Materiali di costruzione del tetto e loro resilienza termica
		Tipologia funzionale
		Caratteristiche sociodemografiche

02D. Parametri e componenti delle schede di rilevazione. Isole urbane di calore (UHI) ed efficientamento energetico

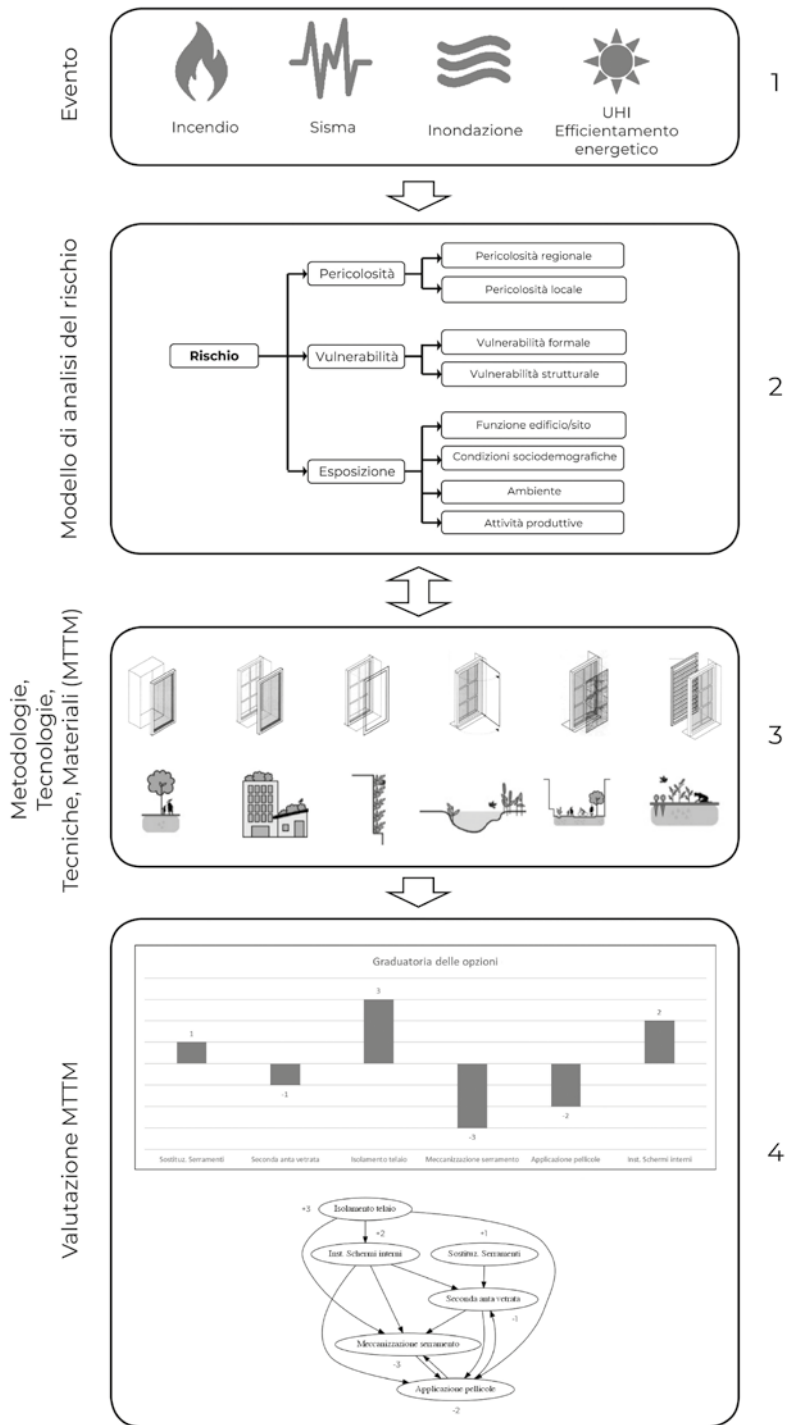


FIGURA 01

Metodologia macroeventi.
E. Rinaldi, 2025.

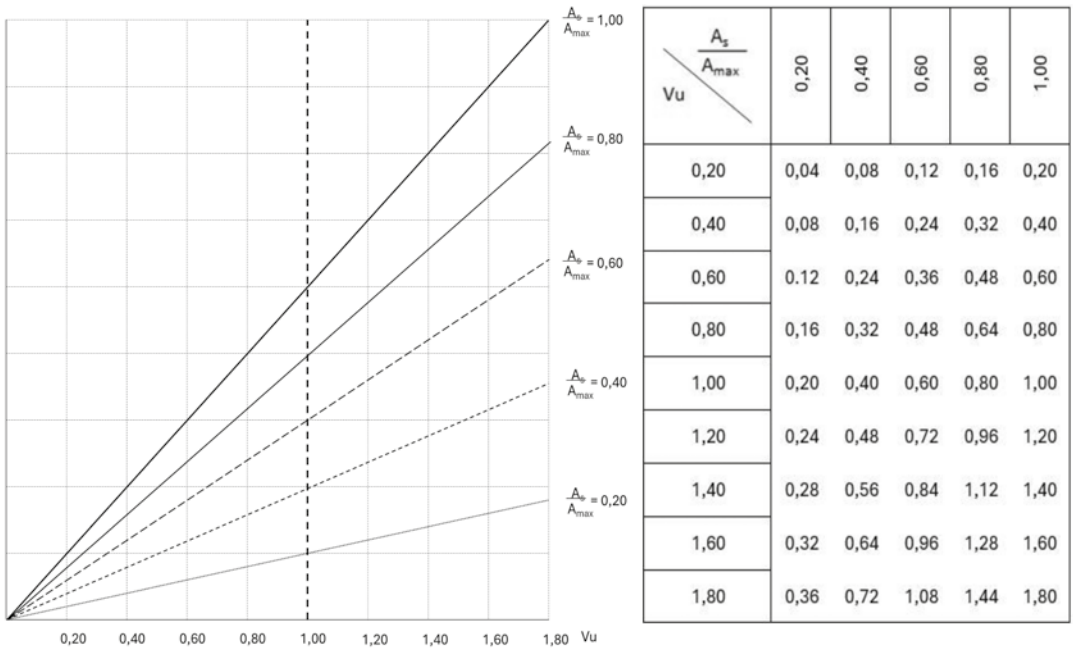


FIGURA 02

Sisma

Correlazione tra vulnerabilità V_u e rapporto A_s/A_{max} . Le celle della matrice a destra contengono i valori della vulnerabilità relativa $V_{u,R}$.

E. Rinaldi, 2025.

colonna I_1 col. I_2 col. I_3 col. I_4 col. I_5 col. I_6 col. II_1 col. II_2 col. II_3 col. II_4

Parameter	Component / indicator	Weight	Weight Normalized (weight sum = 1)	Weight Normalized (max weight = 1)	Observed Value	Num. Value	Norm. Value V	
Regional hazard (Rig)	General seismic conditions / Peak ground acceleration	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
	Local seismic conditions (seismic history)	1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
	Geological conditions / earthquake amplification	1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
	Geological conditions / soil foundation type	1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
Local hazard (Ril)	Conditions of the architectural - urban context	1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
	Links between structural elements	1	0.0270	1.0000	low	2	0.4	
Vulnerability Vu (structure)	Horizontal structures (slab)	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
	Structural materials	1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
	Structural typology	1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
	I.Q.M. index for seismic actions in the plane	1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
	I.Q.M. index for out-of-plane seismic actions	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
	I.Q.M. index for vertical seismic actions	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
	Wall - previous incongruous interventions	1	0.0270	1.0000	very high ****	9	1.8	
	Wall Elements present to contrast the risk	1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
	Roof	1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
	Arch and vault	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
	Foundations	1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
	Resistant vertical elements	1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
	Stairs	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
	Deterioration	1	0.0270	1.0000	low	2	0.4	
	Deterioration by recent earthquake	1	0.0270	1.0000	low	2	0.4	
	Vulnerability Vu (form)	Non structural elements	1	0.0270	1.0000	very high	5	1
		Planimetric features	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6
Altimetric features		1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
Altimetric regularity		1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
Number of holes/openings and distribution on the facade		1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
Position of openings in relation to the dividing walls		1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
Slenderness of the walls		1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	
Adjoining buildings		1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
Masonry renovations		1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
Bridge hole alignment		1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
Reduction of the wall section		1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
Thickness and spacing of the dividing walls		1	0.0270	1.0000	high	4	0.8	
Presence of aggregate elements, regularity in elevation		1	0.0270	1.0000	low	2	0.4	
Architectural context		1	0.0270	1.0000	very high	5	1	
Exposure	Functional typology	1	0.0270	1.0000	low	2	0.4	
	Distribution type	1	0.0270	1.0000	medium	3	0.6	

03A

colonna I_2 col. II_1 col. II_2 col. II_3 col. II_4 col. III_1 col. III_2 col. IV_1 col. IV_2 col. IV_3

Component / indicator	Observed Value	Num. Value	Norm. Value V	Relative values	Suggested priority	Suggested priority normalized
General seismic conditions / Peak ground acceleration	medium	3	0.6			
Local seismic conditions (seismic history)	very high	5	1			
Geological conditions / earthquake amplification	high	4	0.8			
Geological conditions / soil foundation type	very high	5	1			
Conditions of the architectural - urban context	high	4	0.8			
Links between structural elements	low	2	0.4	0.4800	NM	NM
Horizontal structures (slab)	medium	3	0.6	0.2400	0.2400	0.2222
Structural materials	high	4	0.8	0.3600	0.3600	0.3333
Structural typology	high	4	0.8	0.8000	NM	NM
I.Q.M. index for seismic actions in the plane	very high	5	1	0.4800	0.4800	0.4444
I.Q.M. index for out-of-plane seismic actions	medium	3	0.6	0.6000	0.6000	0.5556
I.Q.M. index for vertical seismic actions	medium	3	0.6	0.3600	0.3600	0.3333
Wall - previous incongruous interventions	very high ****	9	1.8	0.6000	0.3600	0.3333
Wall Elements present to contrast the risk	very high	5	1	1.0800	1.0800	1.0000
Roof	high	4	0.8	0.6000	0.6000	0.5556
Arch and vault	medium	3	0.6	0.4800	0.4800	0.4444
Foundations	very high	5	1	0.3600	0.3600	0.3333
Resistant vertical elements	high	4	0.8	0.6000	0.6000	0.5556
Stairs	medium	3	0.6	0.4800	0.4800	0.4444
Deterioration	low	2	0.4	0.3600	0.3600	0.3333
Deterioration by recent earthquake	low	2	0.4	0.2400	NM	NM
Non structural elements	very high	5	1	0.2400	NM	NM
Planimetric features	medium	3	0.6	0.6000	0.6000	0.5556
Altimetric features	high	4	0.8	0.2400	NM	NM
Altimetric regularity	medium	3	0.6	0.3600	NM	NM
Number of holes/openings and distribution on the facade	medium	3	0.6	0.3600	NM	NM
Position of openings in relation to the dividing walls	medium	3	0.6	0.3600	NM	NM
Slenderness of the walls	medium	3	0.6	0.3600	0.3600	0.3333
Adjoining buildings	high	4	0.8	0.4800	0.4800	0.4444
Masonry renovations	very high	5	1	0.6000	NM	NM
Bridge hole alignment	high	4	0.8	0.4800	NM	NM
Reduction of the wall section	very high	5	1	0.6000	NM	NM
Thickness and spacing of the dividing walls	high	4	0.8	0.4800	NM	NM
Presence of aggregate elements, regularity in elevation	low	2	0.4	0.2400	NM	NM
Architectural context	very high	5	1	0.6000	NM	NM
Functional typology	low	2	0.4	0.2400	0.2400	0.2222
Distribution type	medium	3	0.6	0.3600	0.3600	0.3333

03B

FIGURA 03

Modello di analisi del rischio.
Piattaforma di elaborazione. Sisma.
E. Rinaldi, 2025.

Hazard parameters weighted values

	Earthquake - E	Flood - H	Fire - F	UHI - U	Multi-hazard - HM_{multi}
Regional hazard - Rig	0,8500	0,6000	0,5333	0,4400	2,4233
Local hazard - Ril	0,8000	0,7333	0,5000	0,4000	2,4333
Total sum hazard - TH_{event}	1,6500	1,3333	1,0333	0,8400	
Total average hazard - TH_{event}	0,8250	0,6667	0,5167	0,4200	

Vulnerability and exposure parameters weighted values

	Earthquake - E	Flood - H	Fire - F	UHI - U	Multi-hazard - HV_{multi}
Formal Vulnerability - VU_{for}	0,7571	0,4000	0,8000	0,4250	2,3821
Exposure - E	0,4000	0,4000	0,6667	0,4000	1,8667
Structural Vulnerability - VU_{str}	0,7625	0,4000	0,6000	0,2000	1,9625
Total sum Vulnerability - TV_{event}	1,9196	1,2000	2,0667	1,0250	
Total average Vulnerability - TV_{event}	0,6399	0,4000	0,6889	0,3417	

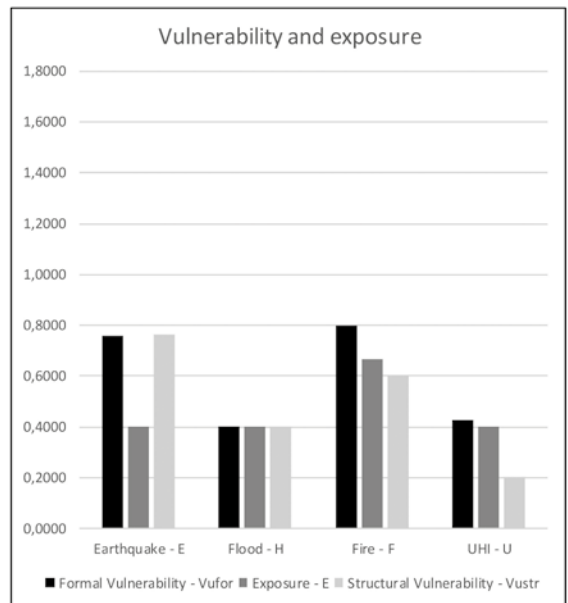
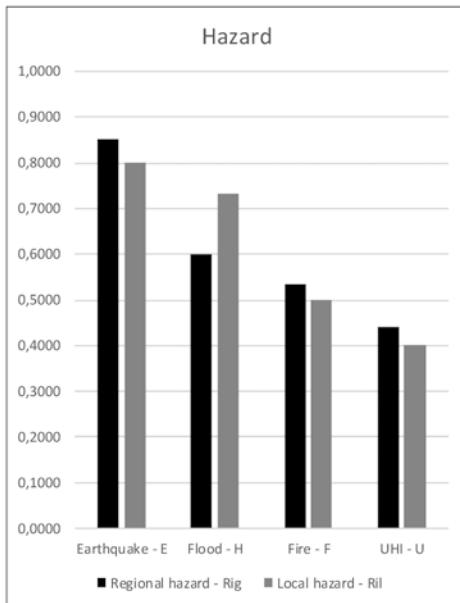


FIGURA 04

Modello di analisi del rischio.
Valori sintetici del rischio.
E. Rinaldi, 2025.

Criteria di valutazione delle MTTM

Tipologie di mitigazione e interventi (MTTM)

Tipologia MTTM	MTTM	Applicabilità e impatti sull'edificio e sul sito(A)			Costi di costruzione e logistica(C)			Sostenibilità del processo produttivo(S)		
		Criterio A.1	Criterio A.i	Criterio A.n	Criterio B.1	Criterio B.i	Criterio B.n	Criterio S.1	Criterio S.i	Criterio S.n
Tipologia MTTM A	MTTM A.1	●●●●●	●●	●●●●	●●	●●●	●●●	●●	●●●●	●
	MTTM A.i	●●●	●	●	●●●	●	●	●	●●●	●●
	MTTM A.n	●●	●●●	●●●	●	●●●●●	●●	●●●●●	●	●●●
Tipologia MTTM B	MTTM B.1	●●●●	●●	●	●●●●●	●	●●●	●●●	●●●●	●●
	MTTM B.i	●●●	●●●	●●	●●●	●●	●	●●●	●	●●●
	MTTM B.n	●	●	●●●	●	●●●●	●	●	●	●●●
Tipologia MTTM C	MTTM C.1	●●●●●	●●●	●●	●●●	●	●●●	●●	●●●	●
	MTTM C.i	●●	●	●●●	●	●●●	●	●	●	●●●
	MTTM C.n	●●●	●●●●	●	●●	●●●●●	●●	●●●	●●●●●	●●●
Pesi dei criteri		WCA.1	WCA.i	WCA.n	WCC.1	WCCA.i	WCCA.n	WCS.1	WCSA.i	WCSA.n

05A

Performance della MTTM rispetto a ogni criterio ● Molto bassa ●● bassa ●●● media ●●●● alta ●●●●● Molto alta

FIGURA 05

Analisi multicriteriale delle MTTM (a) e matrice concettuale di relazione tra indicatori del modello di analisi del rischio e MTTM (b).

E. Rinaldi, 2025.

Metodologie Tecnologie Tecniche Materiali (MTTM) applicabili

Pericolosità del sito e vulnerabilità dei componenti dell'edificio

Parametri	Indicatori	MTTM 1	MTTM 2	MTTM 3	MTTM 4	MTTM 5	...	MTTM i	...	MTTM n-4	MTTM n-3	MTTM n-2	MTTM n-1	MTTM n
Pericolosità locale LH	LH indicatore 1		●	●										
	... LH indicatore i													
	... LH indicatore n	●	●	●										
Vulnerabilità formale FV	FV indicatore 1				●	●								
	... FV indicatore i				●			●						
	... FV indicatore n					●		●		●				
Vulnerabilità strutturale SV	SV indicatore 1										●		●	●
	... SV indicatore i							●				●		●
	... SV indicatore n										●	●	●	●

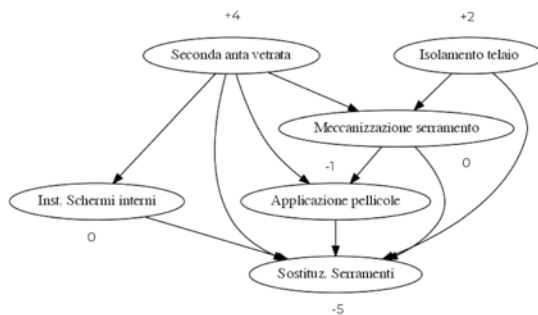
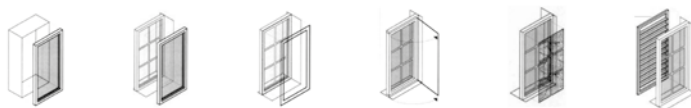
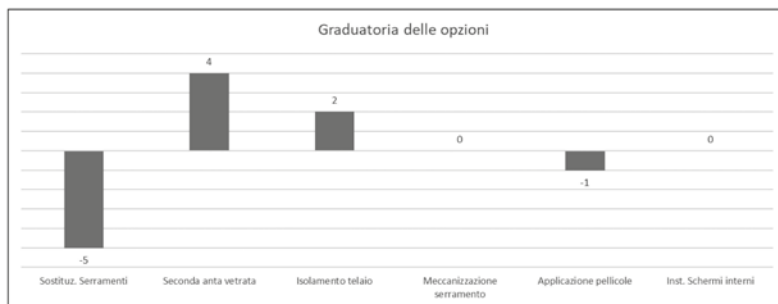


Insiemi di MTTM applicabili ai componenti/indicatori (edificio o sito)

05B

Interventi (MTTM)	Criteri Applicabilità e impatti				
	Efficacia	Applicabilità	Reversibilità	Impatto formale e costruttivo sulla fabbrica (inclusi possibili effetti collaterali)	Durebilità dell'intervento
In. 07. Sostituzione dei serramenti con modelli ad alta prestazione energetica	****	***	*** / ****	***	****
In. 09. Messa in opera, sul lato interno delle ante mobili, di una seconda anta vetrata	**** / *****	****	**** / *****	**** / *****	**** / *****
In. 11. Isolamento e tenuta all'aria del telaio	****	*****	*****	*****	*** / ****
In. 13. Meccanizzazione del serramento esistente o del nuovo serramento	****	**** / *****	**** / *****	**** / *****	****
In. 19. Applicazione al vetro di pellicole a controllo solare	**** / *****	****	**** / *****	*****	*** / ****
In. 20. Installazione di schermi interni	*** / ****	****	****	**** / *****	****
Pesi dei criteri	5	3	2	4	4

06A



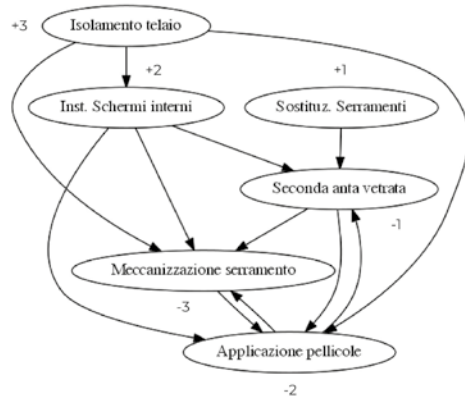
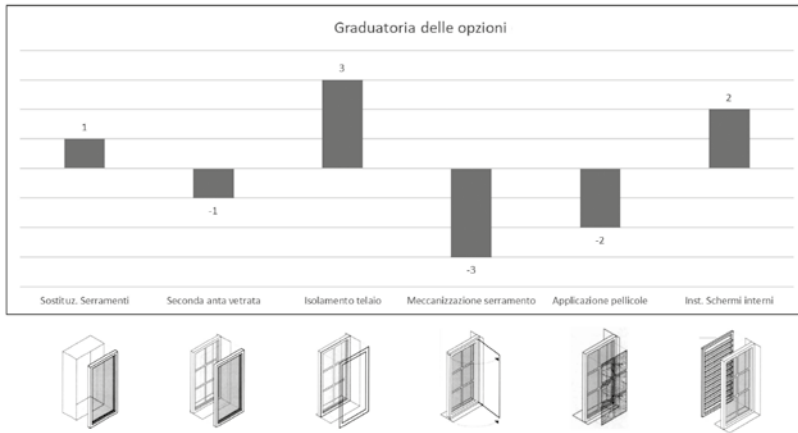
06B

FIGURA 06

Matrice di valutazione delle MTTM per "applicabilità e impatti" e esito della valutazione.
E. Rinaldi, 2025.

Interventi (MTTM)	Criteri Messa in opera, logistica di cantiere e costi						
	Costo monetario	Complessità del cantiere	Disponibilità sul mercato (temporarie)	Tempo di esecuzione	Costi di manutenzione dell'intervento	Necessità di Interventi Integrativi	Limitazione dell'uso dell'edificio
In. 07. Sostituzione dei serramenti con modelli ad alta prestazione energetica	***	***	***	***/****	****	***	***
In. 09. Messa in opera, sul lato interno delle ante mobili, di una seconda anta vetrata	***	***	***	***	***	***	****/****
In. 11. Isolamento e tenuta all'aria del telaio	****	****	****	****	**/***	**/****	****
In. 13. Meccanizzazione del serramento esistente o del nuovo serramento	***	***/****	***	****	***	***	****
In. 19. Applicazione al vetro di pellicole a controllo solare	***/****	**/***	***	****	***	***	****
In. 20. Installazione di schermi interni	****/****	****/****	***	***/****	***	***	***/****
Pesi dei criteri	4	3	3	2	4	4	5

07A



07B

FIGURA 07

Matrice di valutazione delle MTTM per "logistica di cantiere e costi" e esito della valutazione.

E. Rinaldi, 2025.

Capitolo 2



La prova del tempo è sempre da considerare un monito nell'applicazione delle nuove frontiere della ricerca e la possibilità, e necessità, di coniugare le tecniche con i contenuti umanistici costituisce il vero banco di prova, e sperimentazione, delle ricerche di frontiera.

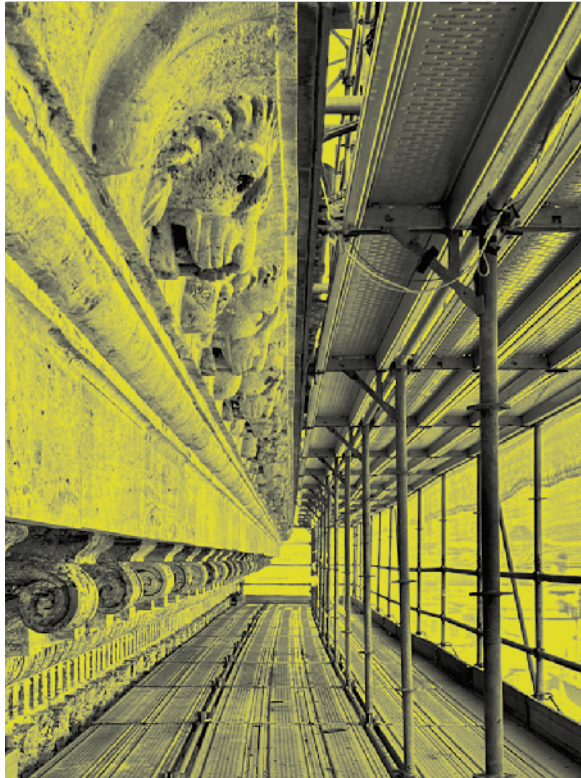
Innovazione e sostenibilità per l'intervento di restauro

Autore

Paolo Faccio

Affiliazione

Università Iuav di
Venezia



Palazzo Farnese, Roma.
Il cantiere di restauro.
P. Faccio, 2024.

Introduzione

L'apparente contraddizione tra conservazione e cambiamento, si manifesta con la volontà di svolgere attività che in qualche modo contribuiscono a cristallizzare lo stato dei luoghi e dell'architettura, con l'obiettivo di rendere immutabile il presente.

Il mondo dell'architettura, e dell'ambiente, ha di fatto sempre raccolto lo spirito innovativo, sia nelle forme che nelle consistenze materiche, processi che oggi possiamo leggere come stratificazioni. Le stratificazioni nel tempo si presentano in forme sia tangibili che intangibili, intese come manifestazioni che hanno consistenza materico costruttiva le prime e l'introduzione di teorie e riflessioni teoretiche le seconde. In entrambi i casi il connubio tra esistente e innovazione, non esclude il principio della conservazione che, in questa ottica, si manifesta con la volontà di conservare le tracce del passato, le stratificazioni, che sono giunte sino a noi e garantirne la possibilità di tramandarle nel futuro. Le attività che coinvolgono l'esistente si arricchiscono, e diventano trasmissibili, anche grazie ai contenuti e ai risultati delle ricerche innovative che vengono applicate all'esistente, divenendo esse stesse parte integrante delle architetture e del paesaggio.

La contraddizione apparente diviene però realtà quando la componente tecnologica e tecnica delle attività innovative, sia nei protocolli applicativi che nei materiali, divengono il solo obiettivo della ricerca, un "virtuosismo" scientifico, dove l'architettura e il paesaggio esistenti divengono un ambito di esercizio, di applicazione e sperimentazione a discapito dei contenuti materico costruttivi e storici, mettendo in secondo piano i caratteri e i contenuti umanistici dell'esistente. Il ricorso a ricerche sempre più avanzate nel campo dei materiali legati alla conservazione hanno nel passato riservato sorprese non sempre positive, quando il connubio tra conservazione e innovazioni ha innescato processi di degenerazione non previsti e in alcuni casi irreversibili. La prova del tempo è sempre da considerare un monito nell'applicazione delle nuove frontiere della ricerca e la possibilità, e necessità, di coniugare le tecniche con i contenuti umanistici costituisce il vero banco di prova, e sperimentazione, delle ricerche di frontiera. Non demonizzare l'innovazione ma utilizzarla per incrementare la conoscenza, costruire sistemi di controllo nel tempo della reazione dell'esistente alla prova dei mutamenti climatici, delle guerre, all'uso sfrenato e incontrollato dell'uomo e al naturale degrado che la materia e le architetture di cui sono composte sono soggette. L'innovazione per la sopravvivenza alla prova del futuro del nostro ambiente, del paesaggio, dell'architettura, proteggendo non solo la consistenza e la forma del presente, con i contenuti che il tempo ci ha consegnato, ma garantendo anche un futuro dove le radici del passato siano sempre leggibili in una logica proattiva della conservazione.

Autori	Sara Di Resta Laura Rappa
Affiliazione	Università Iuav di Venezia



Piazza S. Marco, Venezia.
L'acqua alta mette in pericolo l'integrità fisica del
patrimonio culturale.
L. Rappa, 2019.

Conservazione e gestione sostenibile del patrimonio culturale.

Politiche, strumenti e prospettive di integrazione

Il miglioramento della resilienza del patrimonio culturale ai cambiamenti climatici sta comportando una transizione strategica verso investimenti in nuove forme di salvaguardia e di restauro. Come ribadito dal rapporto pubblicato nel 2022 dal gruppo di esperti degli Stati membri della Commissione Europea nell'ambito del metodo di coordinamento aperto (MCA), un punto di incontro tra l'attuazione del Green Deal Europeo e la tutela del patrimonio culturale risiede proprio nel riconoscere quest'ultimo come strumento di sostenibilità e di resilienza per le comunità (Commissione Europea, 2022).

Come ribadito nel rapporto *The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action* redatto dal Climate Change and Heritage Working Group di ICOMOS (ICOMOS, 2019), il patrimonio di ciascun Paese favorisce la coesione sociale e l'identità collettiva, sostenendo la dimensione culturale della sostenibilità in linea con gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite. *L'European Cultural Heritage Green Paper* (ICOMOS e Europa Nostra, 2021) evidenzia come la conservazione del patrimonio possa contribuire attivamente alle strategie di adattamento climatico, in particolare quando è integrata nella pianificazione locale, nella prevenzione dei rischi e nella costruzione della resilienza. Il *Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage Properties* (UNESCO, 2008) richiama l'attenzione sulla necessità di adottare misure sistematiche di protezione per i siti patrimoniali, comprese la valutazione del rischio, il monitoraggio e la conservazione preventiva. Tra gli strumenti che orientano le politiche europee sul patrimonio culturale e la resilienza climatica c'è il rapporto *Strengthening Cultural Heritage Resilience for Climate Change* (EU – OMC, 2022), dove si ribadisce la necessità di includere il patrimonio nella governance ambientale, sottolineando che i beni culturali debbano essere tutelati attraverso una manutenzione programmata e un monitoraggio scientifico per garantirne la permanenza in un contesto di continuo e profondo cambiamento.

Nonostante l'urgenza evidenziata dai rapporti dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2022; 2023) e dalle deliberazioni delle Conferenze delle Parti nell'ambito della verifica del percorso di attuazione della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (es. COP28, *European Heritage Tribune*, 2023), le politiche climatiche mostrano ancora, in Italia, una significativa carenza di misure specifiche rivolte al patrimonio costruito. Pur essendo fortemente esposta agli effetti del cambiamento climatico, la frazione edificata del nostro territorio non risulta ancora integrata in modo sistematico nei principali strumenti di pianificazione energetico-ambientale, come il *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima*

(PNEC) (MASE, 2020) e il *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (PNACC) (MASE, 2023), rimanendo spesso ai margini del dibattito sulla resilienza e sulla sostenibilità a lungo termine.

FIGURA 01 – P. 68

Anche laddove il patrimonio culturale sia presente nei piani urbanistici o nei progetti di rigenerazione (ad esempio, quelli finanziati dal PNRR), a mancare è ancora un approccio sistemico che sappia integrare obiettivi di tutela, strategie per l'adattamento climatico e principi di sostenibilità. A livello normativo, il D.lgs. 42/2004 – Codice dei beni culturali e del paesaggio (MiBAC, 2004) non prevede misure esplicite per l'adattamento climatico del patrimonio. La revisione della *Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia* (EPBD IV, 2024), comunemente nota come "Direttiva Case Green", prevede deroghe per gli edifici storici nei casi in cui gli interventi di efficientamento energetico possano compromettere il valore storico o architettonico dell'immobile. Tuttavia, in assenza di strategie nazionali mirate, emerge il rischio concreto che tali esenzioni si traducano in un'esclusione, di fatto, dell'esteso segmento del patrimonio culturale – tutelato e non tutelato ai sensi del D.lgs. 42/2004 – dai più ampi processi dedicati alla sostenibilità e alla decarbonizzazione previsti dal *Green Deal* europeo.

Il caso italiano rappresenta un'eccezione parziale. Sebbene la *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (Ministero dell'Ambiente, 2015) e il più recente PNACC (MASE, 2023) includano il patrimonio culturale tra gli ambiti di interesse, soprattutto nelle sezioni dedicate agli insediamenti urbani e ai beni culturali, i riferimenti risultano ancora prevalentemente programmatici e di rado tradotti in strumenti attuativi concreti. Tuttavia, l'Italia si conferma tra i pochi Paesi ad aver formalmente affrontato la questione a livello politico. Le *Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale* (MiBACT, 2015) e l'adozione nazionale della norma europea *UNI EN 16883:2017* (UNI, 2017) testimoniano una maturata consapevolezza della necessità di coniugare conservazione, adattamento climatico e politiche energetiche. Anche il più recente *Documento di indirizzo per la qualità dei progetti di restauro dell'architettura* (SIRA, 2023) include esplicitamente la sostenibilità tra i criteri di qualità dell'intervento, ribadendo il ruolo centrale che le Società Scientifiche stanno assumendo nel più ampio dibattito nazionale.

Complessivamente, queste fonti promuovono una transizione da approcci reattivi a strategie proattive, riconoscendo il patrimonio culturale come risorsa strategica nelle politiche climatiche. Le iniziative collocano il nostro Paese in una posizione avanzata nel calibrare le azioni di conservazione architettonica e urbana con le politiche di adattamento climatico, pur evidenziando la necessità di sviluppare in quest'ambito pratiche esecutive e attuative.

STRUMENTI DI VALUTAZIONE PER UN RESTAURO SOSTENIBILE: CHIMICA VERDE E PROTOCOLLO GBC

Tra gli strumenti a supporto delle decisioni legate al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale, il *Life Cycle Assessment* (LCA) (ISO, 2006a; ISO, 2006b) è il più consolidato. Tuttavia, nel settore della conservazione e del restauro, il suo impiego risulta ancora limitato, soprattutto a causa della mancanza di repository e database dedicati e dell'elevata variabilità e specificità degli interventi, che rendono complesso l'inquadramento di ciascun caso in contesti di dati standardizzati.

Un approccio alternativo e complementare al LCA è rappresentato dall'applicazione diretta dei dodici principi della *Green Chemistry* (Anastas e Warner, 1998), che forniscono indicazioni progettuali basate su criteri quali l'efficienza nell'uso delle risorse, la riduzione del rischio per la salute umana e per l'ambiente, e l'ottimizzazione dei processi in ottica preventiva. Essi offrono parametri analitici oggettivi e quantificabili, utili per orientare la ricerca verso soluzioni in grado di minimizzare il consumo energetico, ridurre la produzione di rifiuti e promuovere l'impiego di sostanze a basso impatto ambientale.

La chimica verde rappresenta uno strumento strategico per orientare la filiera del restauro verso soluzioni tecniche e operative più sicure, a ridotto impatto ambientale, e con un più basso grado di tossicità. In quest'ottica, risulta fondamentale la valutazione delle alternative d'intervento sulla base di un bilancio complessivo delle caratteristiche appena citate, al fine di raggiungere un buon compromesso tra prestazione e processo produttivo. Alla valutazione qualitativa è possibile affiancare un'analisi quantitativa attraverso l'utilizzo delle *Green Chemistry Metrics* (GCM), strumenti che consentono il confronto comparativo tra processi chimici. Rispetto a sistemi complessi come il LCA, le GCM presentano il vantaggio di essere applicabili con costi contenuti, tempi brevi e sulla base di dati comunemente disponibili alle aziende produttrici. Ciò permette di confrontare, in maniera efficiente, alternative chimiche e processi di sintesi differenti relativi al medesimo prodotto.

L'attenzione alla valorizzazione del patrimonio costruito in ottica sostenibile, contribuendo al raggiungimento degli obiettivi ambientali europei ed internazionali, emerge anche dal *Protocollo GBC Historic Building* (Green Building Council Italia, 2017). Nel 2024, *Green Building Council Italia* ne ha pubblicato un aggiornamento che rivede e rafforza i criteri di valutazione per la sostenibilità degli interventi conservativi, mantenendo l'approccio olistico e multicriteriale del documento originario (GBC Italia, 2024). Il GBC Historic Building è un protocollo di certificazione volontaria che valuta il livello di sostenibilità ambientale degli interventi di conservazione e recupero di manufatti storici, promuovendo la tutela del loro valore storico-testimoniale e culturale, basandosi sull'adattamento dei criteri internazionali LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) (USGBC, 2020). Gli obiettivi principali sono:

- integrare criteri di sostenibilità nelle pratiche di conservazione e restauro;
- favorire un approccio multidisciplinare che coinvolga professionisti del restauro, ingegneri, architetti e specialisti in sostenibilità;
- valutare le prestazioni ambientali dell'edificio in relazione al contesto storico;
- promuovere l'efficienza energetica, la riduzione dell'impatto ambientale, l'impiego di materiali sostenibili e la qualità degli ambienti interni, senza compromettere l'integrità dell'edificio.

Il protocollo propone un sistema di valutazione strutturato, basato su criteri qualitativi e quantitativi, finalizzato a determinare il livello di sostenibilità di un intervento di restauro. Tale sistema è articolato secondo sette aree tematiche derivate dai protocolli LEED/GBC, integrate da un'ottava area denominata "Valenza Storica (VS)", appositamente sviluppata per la filiera della conservazione. Quest'ultima rappresenta una delle principali innovazioni del protocollo, in quanto introduce la dimensione storico-culturale come parametro di sostenibilità.

A partire dagli anni '80, autorevoli studiosi tra i quali Salvatore Boscarino (Boscarino, 1984), Roberto Pane (Pane, 1987) e Giovanni Carbonara (Carbonara, 1990) hanno promosso una visione del restauro che si opponeva alla separazione tra istanze tecniche e riflessione storico-critica. Sebbene nel campo del consolidamento strutturale e della sicurezza sismica questi principi abbiano alimentato un'evoluzione scientifica e normativa significativa (PCM, 2011), sul tema dell'efficiamento energetico e della sostenibilità ambientale l'integrazione coerente tra discipline risulta ancora poco matura. La cultura tecnica applicata al restauro opera ancora, troppo frequentemente, senza una visione teorica e intellettuale adeguata, con il rischio di compromettere l'integrità del patrimonio culturale. Sono, dunque, necessari, da una parte, una convergenza interdisciplinare tra saperi storici, architettonici, giuridici e tecnico-scientifici, orientata a una rinnovata cultura della conservazione, dall'altra, un approccio progettuale aggiornato, consapevole e sensibile alla specificità di ogni bene. Affrontare questa sfida richiede l'attivazione di processi che governino il procedere coerente di progettazione, selezione dei materiali, esecuzione, gestione del cantiere e del ciclo di vita degli interventi, sempre nel rispetto della conservazione delle preesistenze. L'intervento sul patrimonio costruito, distinguendosi nettamente dalla ristrutturazione tecnologica motivata da ragioni d'uso o economiche, e collocandosi nell'ambito del restauro, non può prescindere da una chiara definizione degli obiettivi e degli strumenti della conservazione. La volontà di trasmettere l'autenticità delle testimonianze architettoniche del passato si integra in quest'ambito con un uso calibrato e compatibile del bene, in linea con il principio della "conservazione integrata" formulato nella *Dichiarazione di Amsterdam* (Consiglio d'Europa, 1975).

L'estensione del concetto di patrimonio riflette un'evoluzione culturale e semantica fondata su una pluralità di valori (storici, culturali, sociali, antropologici) il cui riconoscimento è il risultato di un processo dinamico, influenzato dagli sviluppi della ricerca e dalla crescente consapevolezza collettiva. Questo processo ha condotto all'estensione progressiva delle possibilità di tutela verso categorie di beni che precedentemente ne erano esclusi, come le architetture del Secondo Novecento. Tale riconoscimento è esito diretto della conoscenza, che costituisce fondamento e orientamento nei processi di conservazione e valorizzazione. Accanto, dunque, al patrimonio architettonico già sottoposto a tutela ai sensi del D.lgs. 42/2004 – Codice dei beni culturali e del paesaggio (MiBAC, 2004) esistono beni potenzialmente tutelabili, che, pur essendo portatori di valori storici, testimoniali e culturali, restano ad oggi esclusi dall'azione di tutela formale e, più in generale, da interventi strutturati di conservazione. Quanto rilevato mette in evidenza il rischio di progressiva perdita di memoria culturale e materiale di un esteso segmento di patrimonio recente, in gran parte realizzato in calcestruzzo armato, che presenta fenomeni di degrado specifici spesso accentuati dal trascorrere del tempo. Anche in questo contesto, le problematiche legate al deterioramento non possono essere affrontate come questioni di sola natura tecnica: esse investono anche dimensioni culturali, poiché incidono sulla percezione, sulla conservazione e sul riconoscimento stesso del valore delle architetture recenti.

È fondamentale, dunque, adottare un approccio conservativo alla sostenibilità, in cui le innovazioni tecnologiche siano selezionate e promosse tenendo conto delle caratteristiche specifiche del bene, che non dovrà risultarne sopraffatto. Integrare tutela, conservazione, sostenibilità e sviluppo è dunque condizione imprescindibile per migliorare la qualità della vita in contesti culturalmente e ambientalmente sensibili.

Il ruolo del patrimonio culturale nello sviluppo sostenibile (ICOMOS, 2013) sottolinea la necessità di conciliare conservazione – ovvero l'insieme delle azioni volte alla comprensione, comunicazione e salvaguardia di un bene patrimoniale, al fine di preservarne i valori culturali per le generazioni presenti e future (Agency for Cultural Affairs *et al.*, 2014) – con la sostenibilità, fondamento della pratica conservativa contemporanea. L'intensificarsi delle sfide ambientali e climatiche richiede approcci diversificati, integrati e multidisciplinari, nei quali la conservazione e il restauro sembrano collocarsi in maniera quasi naturale. Le prospettive, le visioni e gli obiettivi propri della conservazione si pongono da sempre in contrasto con i concetti di spreco, sostituzione e consumo di suolo, rendendo la tutela del patrimonio un'attività intrinsecamente sostenibile.

Inoltre, l'obiettivo della sostenibilità in ogni fase del processo conservativo – dalla progettazione all'esecuzione – rappresenta ormai un principio di responsabilità strettamente connesso agli aspetti etici del restauro (SIRA, 2023). In contesto internazionale, la disciplina basata sull'analisi storico-critica integra i concetti essenziali di autenticità (ICOMOS, 1964;1994; Agency for cultural affairs *et al.*, 2014), integrità (ICOMOS, 2020) e interdisciplinarietà (ICOMOS, 1964), con principi fondamentali quali compatibilità, minimo intervento, reversibilità e distinguibilità (ICOMOS, 1964;2000; Ministero per i beni culturali e ambientali, 1972; SIRA, 2023; Consiglio d'Europa, 2005; UNI, 2019;2023).

Questi principi si declinano in due aspetti chiave: la compatibilità culturale, che tutela i valori immateriali e storici, e la compatibilità materiale, relativa alla coerenza dei materiali e delle tecniche utilizzate, entrambi fattori imprescindibili nelle scelte progettuali, soprattutto in relazione ai principi di reversibilità e distinguibilità. Allo stesso modo, i criteri del minimo intervento e della reversibilità/ritrattabilità delineano un approccio orientato alla cura della consistenza materiale del bene, riconoscendo ogni intervento come parte di un processo da governare e monitorare nel tempo, lasciando aperta la possibilità di ulteriori azioni future, se necessarie.

Il riconoscimento, da parte dell'Unione Europea, della sostenibilità come requisito multidimensionale – che abbraccia dunque aspetti sociali, culturali, ambientali, economici e gestionali – sottolinea la necessità di una visione a lungo termine per affrontare efficacemente le complesse sfide della conservazione del patrimonio, che è unico e irripetibile. Essendo le conoscenze e le tecnologie a nostra disposizione in continua evoluzione e soggette a miglioramenti e cambiamenti, è essenziale adottare un approccio ponderato, capace di delineare pratiche sostenibili ed efficaci nella conservazione, che creino un equilibrio tra rispetto dell'autenticità e integrità del bene e la definizione di risposte efficaci alle sfide pressanti del cambiamento climatico, dell'esaurimento delle risorse e del degrado ambientale. La complessità del processo conservativo, che include l'approvvigionamento dei materiali, le catene di produzione e la logistica del sito, incide sulla sostenibilità complessiva dell'intervento. Nel XXI secolo, un approccio globale alle pratiche di conservazione sostenibile, applicabile sia al patrimonio antico che a quello moderno e contemporaneo, prevede l'impiego di materiali a basso impatto ambientale, la riduzione dei rifiuti e la minimizzazione dell'impronta carbonica, contribuendo alla resilienza a lungo termine del patrimonio e dell'ambiente.

I materiali impiegati negli interventi di restauro svolgono un ruolo fondamentale nel determinare la sostenibilità complessiva dell'azione progettuale. La scelta dei materiali e delle tecniche più idonee implica un

equilibrio tra l'istanza di compatibilità con il substrato, l'impatto ambientale e la durabilità. Inoltre, è necessaria un'adeguata pianificazione nella gestione del trasporto dei materiali, dello smaltimento dei rifiuti e dell'esecuzione dell'intervento, per garantire che il cantiere di restauro abbia un impatto minimo sull'ambiente circostante.

Nonostante la crescente attenzione alla sostenibilità nel restauro architettonico, permangono numerose criticità, tra cui il costo elevato dei materiali cosiddetti "sostenibili" e la domanda di professionisti qualificati in grado di governare sia i principi della conservazione che le pratiche di costruzione sostenibile.

In quest'ottica, la conservazione preventiva (ICCROM, 2017) e programmata (Della Torre, 2015; Moiola e Della Torre, 2023) rappresenta un cambiamento di paradigma nella gestione del patrimonio costruito, promuovendo un approccio orientato alla sostenibilità e alla lunga durata.

FIGURA 02 – P. 69

Come noto, piuttosto che intervenire soltanto in seguito a un danno, la conservazione preventiva mira a identificare, monitorare e mitigare i potenziali fattori di rischio, di natura ambientale, strutturale o antropica, prima che essi compromettano l'integrità del bene. Questo approccio risulta particolarmente rilevante per il patrimonio costruito, per il quale è fondamentale preservare l'autenticità, limitando al minimo gli interventi invasivi. I recenti danni causati dalle catastrofi naturali dimostrano quanto sia urgente adottare misure di prevenzione e messa in sicurezza mirate, che considerino la specificità materica e culturale dei beni architettonici.

FIGURA 03 – P. 70

FIGURA 04 – P. 71

La conservazione programmata, definita attraverso piani di manutenzione periodica e valutazioni multidisciplinari, garantisce la continuità delle misure di protezione, prolunga il ciclo di vita dei materiali e degli elementi costruttivi, e riduce la necessità di interventi di restauro onerosi, generalmente trasformativi e ad alta intensità energetica. Tali strategie si allineano ai principi dello sviluppo sostenibile, favorendo l'uso responsabile delle risorse, la tutela dei valori culturali e la riduzione dell'impatto ambientale. In questo contesto, l'integrazione di strumenti per la valutazione del rischio, sistemi di monitoraggio digitale e protocolli di manutenzione risulta fondamentale per supportare decisioni informate e per ottimizzare la pianificazione degli interventi. L'adozione di pratiche di conservazione preventiva e programmata si conferma dunque come un caposaldo per la tutela sostenibile del patrimonio culturale, sia a scala architettonica che urbana.

Attribuzioni

Il paragrafo introduttivo e il paragrafo dal titolo *Strumenti di valutazione per un restauro sostenibile: chimica verde e protocollo GBC* sono da attribuire a Sara Di Resta, mentre i paragrafi *Integrazione di cultura tecnica, conservativa e riconoscimento valoriale e Principi, sfide e prospettive contemporanee* sono da attribuire a Laura Rappa.

Riferimenti bibliografici

- Agency for Cultural Affairs, Government of Japan, Nara Prefecture e Nara, et al. (2014) *Nara+20 sulla pratica del patrimonio, i valori culturali e il concetto di autenticità*. Incontro tenutosi a Nara, Giappone, 22-24 ottobre 2014.
- Anastas, P., Warner, J. (1998) *Green Chemistry: Theory and Practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Boscarino, S. (1984) *Aspetti tecnici nel restauro dei monumenti*, in *Simposio sul tema: Prospettive della ristrutturazione e consolidamento dei monumenti siciliani*, Siracusa 15 marzo 1984. Roma: ASSIRCCO (dattiloscritto).
- Carbonara, G. (1990) *Restauro dei monumenti. Guida agli elaborati grafici*. Napoli: Liguori editore.

- Consiglio d'Europa (2005) *Convenzione di Faro sul valore del patrimonio culturale per la società*. Faro, 27 ottobre 2005. Strasburgo: Consiglio d'Europa.
- Consiglio d'Europa (1975) *Dichiarazione di Amsterdam – Congresso sul Patrimonio Architettonico Europeo*, 21–25 ottobre 1975. Strasburgo: Consiglio d'Europa. Disponibile su: <https://upa-bua-arch.be/index.php/en/profession/le-cadre-profession-nel-des-architectes/declaration-of-amsterdam-1975> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- Della Torre, S. (a cura di) (2015) *La strategia della conservazione programmata. Dalla progettazione delle attività alla valutazione degli impatti. Atti del convegno Preventive and Planned Conservation, Monza, Mantova, 5–9 maggio 2014*. Firenze: Nardini.
- European Heritage Tribune, 2023 *COP28 High Level Ministerial Dialogue on Culture-Based Climate Action and Emirates Declaration*. European Heritage Tribune, 14 December. Disponibile su: <https://heritage-tribune.eu/europe/cop28-embra-ces-cultural-heritage-in-climate-change-policy-for-a-more-holistic-approach/> (Ultimo accesso: 1 settembre 2025).
- European Union Open Method of Coordination (OMC) Group (2022) *Strengthening Cultural Heritage Resilience for Climate Change: Where the European Green Deal Meets Cultural Heritage*. Brussels: European Commission. Disponibile su: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/19157c7e-2552-11ed-8fa0-01aa75ed71a1> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).
- Green Building Council Italia (2024) *GBC Historic Building – Sistema di verifica: aggiornamento 2024*. Disponibile su: <https://gbcitalia.org/certificazione/gbc-historic-building/gbc-historic-building-documenti/> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- Green Building Council Italia (2017) *Protocollo GBC Historic Building (GBC HB)*. Trento: Green Building Council Italia. Disponibile su: <https://gbcitalia.org/certificazione/gbc-historic-building/gbc-historic-building-documenti/> (Ultimo accesso: 5 settembre 2025).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. Disponibile su: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (Ultimo accesso: 6 settembre 2025).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) *Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report (AR6)*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponibile su: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (Ultimo accesso: 23 agosto 2025).
- International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM) (2017) *Conservation Preventive: un approccio sostenibile alla conservazione del patrimonio culturale*. Roma: ICCROM. ICCROM Toolkit. Disponibile su: <https://www.iccrom.org/it/section/conservazione-preventiva/il-nostro-approccio> (Ultimo accesso: 5 settembre 2025).
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (2000) *Carta di Cracovia: principi per la conservazione e il restauro degli edifici storici*. Cracovia: ICOMOS.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (1964) *Carta di Venezia per la conservazione e il restauro dei monumenti e dei siti*.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (2013) *Dichiarazione di Hangzhou: verso un nuovo mondo del patrimonio*. Adottata alla 19ª Assemblée Generale dell'ICOMOS, Hangzhou, 1-4 ottobre 2014.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (1994) *Documento di Nara sull'autenticità*. Disponibile su: <https://www.icomos.org/charters/nara-e.pdf> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- International Council on Monuments and Sites ICOMOS, Europa Nostra (2021) *European Cultural Heritage Green Paper: Putting Europe's Shared Heritage at the Heart of the European Green Deal*. The Hague: Europa Nostra. Disponibile su: <https://publ.icomos.org/publications/jlbSai?html=Pag&page=Pml/Not&base=technica&ref=F359E32BB5DA2061976BE7D340C5A2B1> (Ultimo accesso: 3 settembre 2025).
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (2020) *European Quality Principles for EU-funded Interventions with Potential Impact upon Cultural Heritage*. Disponibile su: <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2436/> (Ultimo accesso: 3 settembre 2025).
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (2019) *The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action*. Paris: International Council on Monuments and Sites. Disponibile su: <https://openarchive.icomos.org/id/eprint/2459> (Ultimo accesso: 6 settembre 2025).
- International Organization for Standardization (ISO) (2006a) *ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. Geneva: ISO.
- International Organization for Standardization (ISO) (2006b) *ISO 14044:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*. Geneva: ISO.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) et al. (2020) *Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)*. Disponibile su: <https://www.mase.gov.it/comunicati/publicato-il-testo-definitivo-del-piano-energia-e-clima-pniec> (Ultimo accesso: 24 agosto 2025).
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2023) *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)*. Roma: MASE. Disponibile su: <https://www.mase.gov.it/portale/web/guest/-/clima-approvato-il-piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) (2015) *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNAC)*. Roma: MATTM. Disponibile su: <https://www.minambiente.it/pagina/strategia-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici> (Ultimo accesso: 25 agosto 2025).
- Ministero per i Beni Culturali e Ambientali (1972) *Carta italiana del restauro*. Roma: Ministero per i Beni Culturali e Ambientali.
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali e per il Turismo (MiBACT) (2015) *Linee di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale. Architettura, centri e nuclei storici e urbani*. Roma: MiBACT. Disponibile su: <https://www.soprintendenza-pvde.beniculturali.it/la-soprintendenza-informa/atti-di-indirizzo/linee-guida-di-indirizzo-per-il-miglioramento-dellefficienza-energetica-nel-patrimonio-culturale/> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC) (2004) *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 – Codice dei beni culturali e del paesaggio* Disponibile su: <https://www.normattiva.it/eli/id/2004/02/24/004G0066/CONSOLIDATED/20200914> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- Moioli, R., Della Torre, S. (a cura di) (2023) *La conservazione preventiva e programmata: una strategia per il futuro. Premesse, esiti e prospettive degli interventi di Fondazione Cariplo sul territorio*. Firenze: Nardini.
- Pane, R. (1987) *Attualità e dialettica del restauro: educazione all'arte, teoria della conservazione e del restauro dei monumenti* Antologia a cura di Mauro Civita. Chieti: M. Solfanelli.
- Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea (2024) *Direttiva (UE) 2024/1275 del Parlamento europeo e del Consiglio del 24 aprile 2024 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione – EPBD IV, "Direttiva Case Green")*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 202, 8.5.2024, pp. 130–186. Disponibile su: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32024L1275> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- Presidenza del Consiglio dei Ministri (PCM) (2011) *Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, n. 47, 26 febbraio, Supplemento Ordinario n. 54.
- Società Italiana per il Restauro dell'Architettura (SIRA) (2023) *Documento di indirizzo per la qualità dei progetti di restauro dell'architettura*. Disponibile su: <https://www.sira-ristauroarchitettura.it> (Ultimo accesso: 27 agosto 2025).
- UNESCO (2008) *Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage Properties*. Paris: UNESCO World Heritage Centre. Disponibile su: <https://whc.unesco.org/en/documents/10045> (Ultimo accesso: 3 settembre 2025).
- UNI (2017) *UNI EN 16883:2017 – Conservazione dei beni culturali – Linee guida per migliorare la prestazione energetica degli edifici storici*. Milano: Ente Nazionale Italiani di Unificazione (UNI). Disponibile su: <https://www.uni.com/> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- UNI (2019) *UNI EN 15898:2019. Conservazione del patrimonio culturale – Termini generali e definizioni: misura in cui un materiale può essere utilizzato con un altro materiale senza compromettere la rilevanza culturale o la stabilità dell'oggetto*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Disponibile su: <https://www.uni.com/> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- UNI (2023) *UNI 11897:2023 – Conservazione del patrimonio culturale – Linee guida per l'applicazione dei criteri generali di qualità negli interventi di conservazione e restauro dei beni culturali*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione. Disponibile su: <https://www.uni.com/> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- U.S. Green Building Council (USGBC) (2020) *LEED v4.1 for Building Design and Construction*. Washington, D.C.: U.S. Green Building Council. Disponibile su: <https://www.usgbc.org/leed/v41> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).



FIGURA 01

Palazzo Badoer, Venezia.

Danni all'apparato decorativo causati da infiltrazioni di acque meteoriche.

Iuav, 2019.



FIGURA 02

P.L. Nervi, Salone B, Palazzo di Torino Esposizioni.
Indagini preliminari funzionali al piano di conservazione programmata.
G. Bruschi, P. Faccio, 2021.



FIGURA 03

Chiesa di S. Felice Vescovo e Martire, San Felice sul Panaro (MO).

Gli interventi di messa in sicurezza e restauro dopo i danni del sisma del 2012 mostrano la complessità tecnica e culturale della conservazione post-catastrofe.

L. Rappa, 2019.



FIGURA 04

L'Aquila.

Opere di messa in sicurezza dopo il sisma che ha colpito l'Abruzzo nel 2009.

R. Taddeo, 2012.

Autore

Laura Rappa

Affiliazione

Università Iuav di
Venezia



Applicazione a spruzzo di protettivo idrofobizzante a base di silani su superficie in calcestruzzo.
P. WR 100, 2025.

Materiali e processi innovativi per la conservazione sostenibile del costruito

Il deterioramento dei materiali da costruzione, in contesti storici e contemporanei, è centrale nella conservazione del patrimonio. Questo fenomeno complesso, legato a molteplici fattori, comporta alterazioni chimiche, fisiche e meccaniche che compromettono l'integrità fisica e il valore culturale degli edifici (Commissione Europea, 2022). I materiali lapidei, naturali o artificiali, sono vulnerabili all'azione dell'acqua, che ne favorisce il degrado fisico (gelo/disgelo, escursioni termiche) e chimico (trasporto di inquinanti atmosferici). Le cause naturali innescano il degrado, ma le attività antropiche, intensificatesi con la Rivoluzione Industriale nella prima metà del XIX secolo, ne hanno accelerato i ritmi.

I fattori ambientali – umidità, inquinamento atmosferico, variazioni termiche e radiazione UV – sono le principali cause estrinseche di degrado. Il cambiamento climatico amplifica l'intensità e la frequenza di questi agenti, accelerando i processi. L'entità del degrado dipende dall'interazione tra le condizioni ambientali (microclima e qualità dell'aria) e le proprietà intrinseche dei materiali, come composizione chimica e porosità, che influenzano il rischio di compromissione del patrimonio culturale. Diversamente dai materiali lapidei, nel calcestruzzo, materiale più diffuso nel patrimonio del Novecento, si riscontrano fenomeni peculiari di deterioramento come *spalling* (sfaldamento), linee di giunto freddo (*cold-joint*), delaminazione e microfessurazioni (*hair cracks*), che richiedono misure preventive e materiali protettivi specifici (Di Biase, 2009; Piffaretti, 2018; Croft e Macdonald, 2019).

FIGURA 01 – P. 86

L'interazione tra i materiali e l'ambiente circostante guida l'evoluzione dei processi di deterioramento. L'erosione dovuta all'azione di pioggia e vento è particolarmente evidente nelle superfici lapidee esposte, come colonne e statue, che subiscono danni superficiali per esposizione prolungata agli agenti atmosferici. Il deterioramento fisico è principalmente dovuto alle escursioni termiche e ai cicli di gelo/disgelo, mentre il degrado chimico è legato alla presenza di inquinanti trasportati dalle acque meteoriche.

Un ruolo significativo nel degrado delle superfici murarie è svolto dal processo di solubilizzazione e successiva cristallizzazione dei sali, che conduce alla formazione di efflorescenze, sub-efflorescenze e croste, fortemente correlate all'umidità che facilita la migrazione dei sali.

FIGURA 02 – P. 87

Nei substrati porosi, i sali – in particolare quelli marini, noti per la loro

elevata igroscopicità – penetrano in profondità, mentre nei materiali più compatti tendono ad accumularsi in superficie. Come noto, la precipitazione dei sali dipende dall'evaporazione dell'acqua e dalla relativa velocità, rendendo il trattamento di desalinizzazione una fase preliminare imprescindibile negli interventi conservativi (Lubelli e Van Hees, 2010; Granne-*man et al.*, 2019).

Tra gli inquinanti atmosferici che incidono maggiormente sulle superfici dei manufatti in ambiente urbano figurano il biossido di zolfo, l'anidride carbonica, gli ossidi di azoto e il particolato atmosferico, che favoriscono la formazione di depositi incoerenti o coerenti, come incrostazioni e croste nere. Queste ultime, composte prevalentemente da gesso, talvolta associato a residui di calcite ricristallizzata e quarzo, causano gravi forme di degrado, quali fessurazioni, disgregazioni e perdita di materiale, fenomeni dovuti alla diversa risposta meccanica tra substrato e deposito (Lazzarini e Tabasso, 2010). L'umidità accelera l'assorbimento degli inquinanti e la formazione di acido solforico, che reagisce con il carbonato di calcio generando gesso e causando fenomeni di dissoluzione nei litotipi carbonatici.

Le pietre silicee, come graniti, basalti e porfidi, meno porose, offrono maggiore resistenza agli agenti atmosferici; i litotipi carbonatici, quali travertino e marmo, più porosi e reattivi, sono maggiormente esposti alla solubilizzazione acida.

Un'ulteriore criticità nella conservazione dei materiali da costruzione è rappresentata dal biodeterioramento, che può compromettere non solo l'integrità e la coesione dei materiali, ma anche le caratteristiche estetiche delle superfici. Indotto da microrganismi e organismi vegetali e influenzato da umidità, luce, temperatura e composizione del substrato, il processo di colonizzazione biologica si manifesta attraverso la proliferazione di batteri, funghi, alghe, muschi e licheni.

I fenomeni di degrado del calcestruzzo (Di Biase, 2009; Piffaretti, 2018; Croft e Macdonald, 2018) sono dovuti prevalentemente a modificazioni chimiche che coinvolgono le superfici. Agenti aggressivi come cloruri, composti azotati e solfati, presenti in acque meteoriche e marine ne compromettono coesione e compattezza. La causa più comune di degrado nelle strutture in calcestruzzo armato è la corrosione delle armature metalliche, normalmente protette dal copriferro, che può venire meno quando il pH del calcestruzzo scende al di sotto di 9 o quando i cloruri penetrano nella matrice cementizia. Questo processo è dovuto al fenomeno della carbonatazione attivato dalla reazione dell'anidride carbonica presente nell'aria con l'idrossido di calcio nel calcestruzzo, formando carbonato di calcio. La reazione inizia in superficie e progredisce verso l'interno, fino a raggiungere le armature. L'alterazione dell'ambiente alcalino genera nel ferro fenomeni di ossidazione che portano ad un aumento di sezione delle barre, producendo sollecitazioni espansive che provocano fessurazioni e distacco del copriferro. La corrosione da cloruri si verifica invece in ambienti marini o in caso di impiego di sali disgelanti, e produce fenomeni di riduzione della sezione resistente delle armature. Il degrado fisico-meccanico in ambienti freddi e umidi è innescato dalla presenza di acqua nei pori del calcestruzzo: i cicli gelo-disgelo generano un progressivo deterioramento superficiale, che tende ad approfondirsi nel tempo. Anche solfati e reazioni alcali-aggregati formano composti espansivi (ettringite, gesso) che possono causare fessurazioni.

Le strategie di conservazione si sono evolute, sostituendo i metodi tradizionali con approcci scientifici che integrano materiali e tecnologie avanzate, sistemi di monitoraggio e modelli predittivi. Serve un approccio multidisciplinare che integri conservazione, ingegneria e scienza dei materiali, per rispondere efficacemente alle vulnerabilità del patrimonio

costruito. Rimane tuttavia complesso bilanciare le esigenze conservative con le istanze contemporanee, garantendo l'integrità e l'autenticità del patrimonio architettonico.

La protezione delle superfici richiede l'impiego di materiali ad alte prestazioni, selezionati in base a criteri sempre più stringenti. Tuttavia, nessun materiale garantisce una conservazione assoluta, poiché ogni intervento determina inevitabilmente una trasformazione, anche minima, del bene. Un progetto conservativo di qualità dovrà pertanto valutare attentamente l'interazione tra materiali esistenti e nuovi, misurandone l'impatto fisico e percettivo. In tale contesto, i materiali innovativi diventano parte integrante del bene e del processo di conservazione.

L'introduzione di materiali e tecnologie a ridotto impatto ambientale nella pratica del cantiere richiede un'attenta analisi orientata all'innovazione e alla sostenibilità, per identificare le soluzioni più adatte a investimenti e ricerca. Le strategie più recenti puntano all'ibridazione tra materiali tradizionali e tecnologie avanzate, tra cui materiali nanostrutturati, di recupero o a ciclo di vita controllato (Pacheco-Torgal *et al.*, 2015). Nel restauro, la sostenibilità si attua integrando materiali, contesto e obiettivi dell'intervento, promuovendo soluzioni rispettose del patrimonio e orientate alla resilienza.

INTERVENTI DI PULITURA

La pulitura è una fase cruciale nella conservazione dei materiali lapidei, finalizzata a rimuovere sostanze indesiderate che possono danneggiare fisicamente o chimicamente le superfici del patrimonio, o comprometterne la leggibilità. Il successo dell'intervento dipende dalla selettività, dalla caratterizzazione del substrato e dalla valutazione del degrado e del contesto. La ricerca recente punta su metodi più controllabili e sostanze chimiche ecocompatibili. Si descrivono di seguito le tecniche selezionate dal progetto di ricerca per la loro efficacia, sostenibilità e capacità di garantire interventi mirati e rispettosi dell'integrità delle superfici del patrimonio costruito.

Nanofluidi. I fluidi nanostrutturati, come soluzioni micellari e microemulsioni, rappresentano alternative efficaci ai solventi organici per la rimozione di rivestimenti da substrati porosi. Le prime sono sistemi monofase costituiti da tensioattivi dispersi in acqua, le seconde sono miscele stabili di due fasi liquide, stabilizzate da tensioattivi. Questi sistemi sono efficaci nella rimozione di polimeri sintetici, solfati e cloruri, rivestimenti vinilici e acrilici, resine polisilossaniche, spesso difficili da eliminare con le tecniche tradizionali. I fluidi nanostrutturati agiscono come contenitori di solventi che interagiscono con il film polimerico, inducendo processi di *dewetting* o rigonfiamento che permettono il distacco completo del film senza dissolverli (Baglioni *et al.*, 2018; Raudino *et al.*, 2015). Grazie alla loro capacità solubilizzante, rappresentano un'alternativa sostenibile per la pulitura superficiale. Studi recenti ne documentano l'impiego nella pulitura della pietra come il marmo di Carrara. L'impiego di nanotubi di *halloysite* in formulazioni chimiche ha inoltre mostrato buoni risultati nella pulitura del marmo (Cavallaro *et al.*, 2020).

Gel, nanogel e reti polimeriche. I gel sono usati per rimuovere depositi superficiali, incrostazioni e polimeri, e possono essere formulati per adattarsi allo strato da rimuovere. Tuttavia, l'impiego di solventi all'interno della matrice gelificata può lasciare residui del gelificante, compromettendo l'efficacia del trattamento. Per ridurre l'impatto dell'acqua si utilizzano formulazioni a base di gomma e idrogel di agar. L'agar, in particolare, ha dimostrato

ottima efficacia nella rimozione di terra, sali e fuliggine da superfici marmoree, grazie alla sua capacità di aumentare la viscosità dell'acqua e conferire rigidità al gel. Questa caratteristica lo rende idoneo all'impiego su superfici piane e uniformi. Il trattamento è semplice, selettivo, graduale, atossico e raramente necessita di risciacquo. Dagli studi finora condotti non sono stati rilevati effetti collaterali significativi, come lo sbiancamento delle superfici (Gulotta *et al.*, 2014). I gel rigidi di agar possono essere applicati su substrati porosi e sono efficaci nella rimozione di sostanze idrosolubili. Oltre all'acqua, è possibile incorporare acidi, basi, agenti chelanti o tensioattivi per ottenere effetti specifici. Preparabile direttamente *in situ*, è efficace anche su gesso e come gelificante per soluzioni enzimatiche. Recentemente, sono stati sviluppati gel acquosi a base di poliacrilati combinati con agenti chelanti, efficaci nella conservazione della pittura murale (Beltrami *et al.*, 2019). Il metodo si distingue per la rapidità di applicazione e rimozione, oltre che per l'economicità, data la ridotta quantità di gel necessaria. I nanogel, costituiti da idrogel o reti polimeriche idrofile sintetiche o naturali, chimicamente o fisicamente reticolate, possono inglobare diversi mezzi liquidi, dai solventi organici alle microemulsioni, rendendoli estremamente versatili (Mastrangelo *et al.*, 2017). Il rilascio controllato riduce il rischio di rigonfiamenti e penetrazioni nei pori, offrendo un'alternativa efficace ai solventi organici. Sono generalmente caratterizzati da scarsa tossicità e presentano un basso tasso di evaporazione, migliorando l'efficacia pulente. Tuttavia, la progettazione e l'applicazione particolarmente complesse di tali gel rendono questa procedura non conveniente dal punto di vista economico per la pulizia di grandi superfici (Gherardi e Meravelaki, 2022). I gel nanostrutturati rappresentano una soluzione particolarmente indicata per l'intervento su superfici di rilevante valore artistico. Questi gel offrono un'elevata efficacia pulente e rimovibili facilmente, anche se il controllo del processo applicativo richiede attenzione. L'integrazione tra gel e microemulsioni può includere nanoparticelle magnetiche (come la ferrite) e microemulsioni olio-in-acqua per creare un sistema gelificato che agisce come una spugna attrattiva nei confronti di sporco, vernici e polimeri. Il processo prevede la solubilizzazione del polimero, la cattura dei suoi componenti e l'incorporazione nel gel. Dopo la rimozione, il composito gelificato può essere facilmente lavato con acqua, mentre le spugne magnetiche possono essere essiccate e riutilizzate (Gherardi e Meravelaki, 2022). I gel *peelable* ad alta elasticità possono essere rimossi tramite semplice rimozione per distacco, senza lasciare residui. Le formulazioni principali si basano su alcool polivinilico (PVA), che conferisce la possibilità di essere rimosse sotto forma di film continuo, e su una rete polimerica. Tali gel sono applicabili su diversi substrati, incluso il calcare poroso (Riedo *et al.*, 2015), e possono essere caricati sia con detergenti acquosi che con soluzioni organiche. Il PVA è un materiale sostenibile e biocompatibile. Sperimentazioni su Paraloid B72 invecchiato, acetato di polivinile e silicone acrilico hanno dimostrato un buon controllo e una compatibilità ambientale elevata (Sun *et al.*, 2015). Applicazioni su materiali degradati a base di PVA e nanoparticelle d'argento mostrano anche un potenziale effetto antimicrobico (Boccalon *et al.*, 2021).

Composti microbici e biopulitura. Un approccio incoraggiante nell'ambito della pulizia delle superfici è rappresentato dall'uso di composti microbici. Diversi microrganismi sono infatti in grado di contribuire alla degradazione biologica dei polimeri sintetici, rendendoli utili alla loro rimozione. Questa tecnologia sfrutta i processi metabolici dei microrganismi, come alternativa ai metodi tradizionali (Ranalli e Zanardini, 2021). Alcuni funghi e batteri sono in grado di degradare acrilici sintetici. L'impiego di

batteri solfato-riduttori ha dato ottimi risultati nella rimozione di depositi superficiali e croste nere, preservando la patina nobile e senza rilasciare sottoprodotti dannosi, come il solfato di sodio (Troiano *et al.*, 2013). Tali microrganismi risultano efficaci anche nel caso di presenza di efflorescenze saline su superfici lapidee (Bosch *et al.*, 2015). Questi sistemi risultano ecocompatibili, facilmente controllabili ed economicamente sostenibili. Le superfici trattate mantengono inoltre un aspetto stabile e non alterato. È tuttavia fondamentale selezionare accuratamente gli organismi eterotrofi, poiché alcuni possono risultare dannosi per i materiali lapidei. I sistemi di biopulitura richiedono però verifiche su larga scala, monitoraggi a lungo termine e un abbattimento dei costi di produzione.

Plasma. Il plasma è un gas ionizzato contenente composti altamente reattivi, la cui natura dipende dal tipo di gas impiegato (aria, ossigeno, idrogeno, ecc.) (Voltolina *et al.*, 2016). Questa tecnologia consente un trattamento superficiale preciso e non invasivo, evitando l'introduzione di solventi nei pori. Il plasma è stato sperimentato su numerosi materiali, tra cui pietra Serena, pietra d'Istria, marmo di Carrara invecchiato termicamente e pitture murali con rivestimenti a base di resine epossidiche, silossani, acrilici e croste nere (Gherardi e Meravelaki, 2022). A seconda del tipo di plasma, temperatura e tempo di esposizione, è possibile degradare e rimuovere efficacemente rivestimenti sintetici sia nuovi che invecchiati. Permangono però alcune criticità, come la potenziale deposizione di metalli derivanti dal deterioramento degli elettrodi (Voltolina *et al.*, 2016).

TRATTAMENTI DI PROTEZIONE

A conclusione del restauro, i trattamenti protettivi mirano a preservare le superfici architettoniche dagli effetti del degrado, dovuto a fattori ambientali e antropici, tramite l'applicazione di materiali con adeguate proprietà chimico-fisiche. L'applicazione avviene su superfici preventivamente pulite, tramite pennello, spruzzo o rullo, con preferenza per il pennello in presenza di superfici architettoniche decorate, dato il maggior controllo e la distribuzione uniforme. Le tecnologie recenti hanno permesso lo sviluppo di protettivi ad alte prestazioni, capaci di prevenire forme di degrado come depositi e colonizzazione biologica, indotti da agenti atmosferici, sostanze corrosive o microrganismi.

La scelta del protettivo deve considerare porosità e rugosità del substrato e le condizioni ambientali. I materiali devono garantire: idrorepellenza, stabilità chimica e fisica, ritrattabilità, durabilità, atossicità, buona adesione, penetrazione, distribuzione omogenea sulla superficie e mantenimento delle caratteristiche estetiche. Inoltre, è fondamentale preservare la permeabilità al vapore, in particolare in presenza di sali igroscopici, per evitare fenomeni di distacco. L'efficacia del trattamento dipende anche dalla concentrazione della formulazione, dalla durata e dalla modalità di applicazione. Negli ultimi anni sono state sviluppate formulazioni innovative, sostenibili e nanostrutturate, adatte all'applicazione su beni architettonici. Questi protettivi ibridi, caratterizzati da bassa tossicità, alta reattività, offrono proprietà idrofobiche, fotocatalitiche, antivegetative e autopulenti. Tra le nanoparticelle più impiegate vi sono il biossido di titanio, l'ossido di zinco, l'argento e la silice. I nanomateriali possono essere dispersi in solventi a rapida evaporazione, come acqua ed etanolo, oppure incorporati in matrici organiche o inorganiche, come polimeri naturali e sintetici (silossani, resine acriliche, idrogel, miscele con polivinile, ecc.) per una maggiore stabilità. Sulle superfici in calcestruzzo sono invece preferiti trattamenti idrofobici come i rivestimenti

bio-based. Promuovere l'uso di queste tecnologie innovative rappresenta un passo significativo verso gli obiettivi di sostenibilità. Un ulteriore aspetto rilevante nella produzione dei nanomateriali riguarda i processi di sintesi, progettati per essere semplici, riproducibili e adatti allo sviluppo di formulazioni competitive e pronte per il mercato (Franco-Castillo *et al.*, 2021).

Rivestimenti autopulenti, trattamenti fotocatalitici e antivegetativi [superficie: pietra e muratura]

Formulazioni innovative con nanoparticelle come biossido di titanio e biossido di silicio in matrici polimeriche conferiscono idrofobicità alle superfici. Questo fenomeno, noto come “effetto loto”, imita il comportamento delle foglie di questa pianta: grazie a un meccanismo indotto dalla luce solare, le nanoparticelle mantengono le gocce d'acqua in rilievo che poi scivolano sulla foglia trascinando con sé lo sporco. Le tecnologie fotocatalitiche contribuiscono anche alla purificazione dell'aria utilizzando la luce solare come fonte energetica pulita e sostenibile. L'applicazione di questi prodotti avviene mediante pennello o spruzzo (Karapanagiotis e Hosseini, 2018). L'idrorepellenza è favorita dalla rugosità della superficie, regolabile variando la concentrazione delle nanoparticelle nei nanocompositi. Questi rivestimenti non alterano l'aspetto macroscopico, ma quello nanometrico: la luce, attivando il materiale, lo rende sostenibile per l'ambiente.

I rivestimenti con nanoparticelle di biossido di titanio (TiO₂) offrono eccellenti proprietà autopulenti e antinquinamento grazie alla loro fotoattività, che modifica la rugosità superficiale tramite reazioni fotocatalitiche (Ausiello, 2018). Le superfici trattate possono raggiungere sia superidrofoicità sia superidrofilicità, consentendo un'efficace rimozione dello sporco (Ausiello, 2018). I vantaggi del TiO₂ includono elevata stabilità meccanica, termica e chimica (Ranogajec *et al.*, 2015), bassa tossicità, costo contenuto e ampia disponibilità naturale (Gherardi *et al.*, 2017). Una penetrazione più profonda nel substrato ne aumenta l'efficacia a lungo termine. Diversi studi hanno dimostrato l'efficacia delle dispersioni idrofile su materiali come marmo, travertino e calcarenite (Quagliarini *et al.*, 2012; Gherardi *et al.*, 2018), con particolare attenzione alle pietre calcaree esposte in ambienti urbani (Colangiuli *et al.*, 2019). Le nanoparticelle di ossido di zinco (ZnO), attive anche in assenza di luce, offrono proprietà fotocatalitiche, antibatteriche e antifungine (Aldosari *et al.*, 2019; Becerra *et al.*, 2019). Lo ZnO, spesso associato a grafene, mostra un'elevata efficacia contro attacchi microbici su materiali come il calcare di Noto, il marmo di Carrara e i mattoni (Schifano *et al.*, 2020).

Innovazioni recenti prevedono l'integrazione di nanomateriali in rivestimenti tradizionali, come ad esempio l'introduzione di nanoparticelle di TiO₂ e ZnO nel marmorino, finitura veneziana a base di calce e scaglie di marmo (Scappin *et al.*, 2022; Campostrini *et al.*, 2025b).

I nanomateriali con proprietà antimicrobiche rappresentano una risorsa innovativa nei trattamenti conservativi, grazie alla loro capacità protettiva contro i biodeteriogeni. Tuttavia, i biocidi nanostrutturati condividono alcune criticità con quelli tradizionali, quali tossicità, limitata durabilità, alterazioni cromatiche (Boccalon *et al.*, 2021).

Tra i materiali più studiati, l'argento si distingue per l'elevata efficacia antimicrobica; tuttavia il rischio di alterazioni cromatiche e variazione della lucentezza ne limita l'uso. Per mitigare questi effetti, viene abbinato a polimeri siliconici o idrogel rimovibili (Boccalon *et al.*, 2021), preservando l'integrità e l'aspetto originale delle superfici.

Un altro nanomateriale largamente impiegato è il biossido di silicio (SiO₂), noto per le sue proprietà idrofobiche e anti-graffiti (Zarzuela *et al.*, 2019). Il SiO₂ è spesso impiegato in sistemi compositi con TiO₂, ZnO o argento,

per combinare proprietà antimicrobiche e idrofobiche (Campostrini *et al.*, 2025a). Tra le soluzioni più avanzate, la silice mesoporosa caricata con biocidi prolunga nel tempo l'efficacia antimicrobica (Presentato *et al.*, 2020), mentre la nanosilice in matrici polimeriche fluorurate migliora la protezione superficiale (Lettieri *et al.*, 2019). Questi sistemi offrono elevata biocompatibilità, biodegradabilità e resistenza agli attacchi microbici, rendendoli adatti ai trattamenti conservativi (Casaletto *et al.*, 2016).

Infine, gli oli essenziali, derivati da matrici vegetali naturali, rappresentano un'alternativa ecologica ai biocidi sintetici, promuovendo un approccio sostenibile nella protezione del patrimonio culturale (Fidanza e Caneva, 2019).

Trattamenti idrofobici e rivestimenti bio-based [superficie: calcestruzzo]

Prodotti idrofobici a scala nanometrica a base di silani e silossani (Piffaretti, 2018; Li *et al.*, 2024; Shen *et al.*, 2019) e silicati sono utilizzati per proteggere le superfici in calcestruzzo esposte (Dong, 2023). Questi trattamenti formano una pellicola impermeabilizzante che impedisce l'assorbimento di acqua, preservando l'aspetto del calcestruzzo. Secondo la norma EN 1504-2 (CEN, 2004), i trattamenti superficiali per calcestruzzo esposto si dividono in tre categorie principali: rivestimenti polimerici e cementizi (film continuo di vari spessori), trattamenti di ostruzione dei pori (barriere localizzate) e impregnazioni idrofobiche (rivestimenti distribuiti che penetrano nei pori). A queste si aggiungono i rivestimenti bio-based. Trattamenti specifici rendono idrofobo il calcestruzzo, normalmente idrofilo, creando una barriera fisica all'acqua. Ciò limita la penetrazione di agenti aggressivi solubili e di CO₂ atmosferica, riducendo il rischio di carbonatazione. L'impregnazione con silani e i rivestimenti poliuretani si dimostrano efficaci contro la penetrazione dei cloruri. L'obiettivo comune è incrementare la durabilità del calcestruzzo. I rivestimenti a base di silani, silossani, acrilici e poliuretani, arricchiti con nanoparticelle, migliorano la resistenza alla corrosione e la durabilità. Formulazioni avanzate che integrano polisilossani, alcol polivinilico e nanoparticelle di silice modificano la rugosità superficiale, accrescendo l'idrofobicità (Zhao *et al.*, 2018). I rivestimenti polimerici organici, inclusi i nanocompositi, offrono buone prestazioni, ma possono comportare rischi legati alla tossicità. I rivestimenti bituminosi riducono l'assorbimento d'acqua e la penetrazione dei cloruri (Elnaggar *et al.*, 2019). Sebbene efficaci, i rivestimenti a base di silani e silossani necessitano di ulteriori studi per valutarne il comportamento in condizioni estreme (es. cicli gelo-disgelo). I trattamenti di ostruzione dei pori a base di silicati di litio, sodio e calcio generano gel stabili che ostacolano la penetrazione di agenti nocivi (Coffetti *et al.*, 2021); tuttavia, risultano meno efficaci su fenomeni preesistenti, come microfessure. Studi dimostrerebbero che i trattamenti trasparenti, applicati a spruzzo o rullo, possono mantenere la loro efficacia protettiva fino a 20 anni, preservando inalterato l'aspetto originale del calcestruzzo (Christodoulou *et al.*, 2013).

I rivestimenti *bio-based*, ricavati da materiali naturali e di scarto, offrono ottime proprietà idrorepellenti, sono atossici, pur presentando oggi costi di produzione elevati. I geopolimeri (Barone *et al.*, 2016), rappresentano un'alternativa sostenibile ai leganti cementizi tradizionali. Questa classe di materiali include anche rivestimenti formulati con scarti agricoli, oli vegetali, acidi grassi, proteine, cellulosa e cere vegetali, impiegati per la conservazione e protezione delle superfici. I geopolimeri garantiscono basse emissioni di CO₂ durante la produzione (Di Mundo *et al.*, 2020) e una resistenza agli agenti inquinanti, ambienti aggressivi (Giacobello *et al.*, 2022) e marini (Pan *et al.*, 2017). Mostrano inoltre bassa permeabilità ai cloruri, elevata durabilità (Coffetti *et al.*, 2021; Balaguru *et al.*, 2008; Jiang, 2020) e buone proprietà di adesione e traspirabilità (Pagnotta *et al.*, 2020). Rivestimenti superidrofobici

a base di scarti agricoli (Wu *et al.*, 2021; Husni *et al.*, 2017), come oli vegetali e acidi grassi, sono atossici, biodegradabili, economici e fluidi, eliminando l'uso di solventi o plastificanti (Sarcinella e Frigione, 2023). Formulazioni con olio di ricino offrono proprietà idrorepellenti, antigraffito, autopulenti e anticorrosive (Zhong *et al.*, 2020). Altre formulazioni promettenti includono polimeri naturali derivati dalla cellulosa e nanoparticelle di silice, nonché rivestimenti a base di cere vegetali, tutti caratterizzati da buona resistenza agli agenti atmosferici (Morissette *et al.*, 2018, Gupta *et al.*, 2021, Wang *et al.*, 2022). Queste tecniche mostrano elevata resistenza alla carbonatazione e una bassa permeabilità ai cloruri, comparabile a quella dei prodotti a base di silani, mantenendo trasparenza e idrorepellenza (De Belie e Wang, 2015). Tuttavia, l'elevato costo di produzione ne limita attualmente la diffusione.

CRITERI DI SOSTENIBILITÀ NEL PROCESSO DI CONSERVAZIONE

Nella conservazione del patrimonio culturale, i criteri di sostenibilità sono strumenti chiave per orientare la scelta di materiali e tecniche innovative. Assumono, infatti, un ruolo strategico nell'integrazione dei processi decisionali legati agli interventi conservativi, contribuendo a definire approcci più efficaci e rispettosi dell'ambiente.

La sinergia tra il settore della conservazione e quello della ricerca scientifica sta consentendo di introdurre approcci innovativi per il miglioramento e l'adattamento dei materiali storici e moderni ai cambiamenti climatici. Tuttavia, l'impiego dei prodotti più recenti sviluppati per la conservazione del patrimonio culturale – monumenti, complessi architettonici e siti di rilevanza culturale (UNESCO, 1972) – dovrà sempre rispondere ai principi delineati nelle Carte del Restauro (ICOMOS, 1964; 1994; 2000; Ministero per i beni culturali e ambientali, 1972; Agency for Cultural Affairs *et al.*, 2014) quali la reversibilità/ritrattabilità, la compatibilità e la durabilità. In particolare, i rivestimenti protettivi devono garantire trasparenza, reversibilità, compatibilità, durabilità, ridotti costi di manutenzione e bassa tossicità, nonché evitare alterazioni percettibili dell'aspetto esteriore delle superfici trattate (ICOM-CC, 2008). A tali caratteristiche si affianca l'esigenza di sviluppare materiali e metodi conformi ai principi della sostenibilità ambientale, che tutelino operatori, conservatori e ambiente.

La Tabella 1 sintetizza i principali criteri metodologici, ambientali, economici e gestionali identificati dalla ricerca per la valutazione dei materiali innovativi destinati a interventi sostenibili nel campo della conservazione.

TABELLA 01 – P. 85

VERSO UN MODELLO DI ANALISI E VALUTAZIONE DEL DEGRADO E DEGLI SCENARI OPERATIVI

Le superfici architettoniche, interfaccia tra edificio e ambiente, rappresentano l'elemento dell'architettura che definisce l'immagine dell'edificio e, con esso, delle città. Su di esse si concentrano gli effetti dei raggi ultravioletti, degli agenti atmosferici, dei cicli termici giornalieri e stagionali, nonché degli inquinanti e del biodeterioramento. I materiali più comuni delle facciate del patrimonio edilizio, sia storico che contemporaneo, includono la pietra naturale (marmi, arenarie, calcari), la muratura, il calcestruzzo faccia a vista e gli intonaci. In tale contesto, l'analisi delle tecniche e dei materiali innovativi e sostenibili per il restauro si concentra in particolare sui metodi di pulitura e sui trattamenti protettivi, volti a regolare l'interazione tra superficie architettonica e ambiente.

Lo studio distingue due principali categorie di alterazione e degrado delle superfici, in accordo con il documento ICOMOS-ISCS *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*: “alterazione cromatica e deposito” e “colonizzazione biologica” (ICOMOS-ISCS, 2008). La definizione di un modello di analisi e valutazione del degrado implica la considerazione di molteplici fattori, con l’obiettivo di elaborare strategie di intervento integrate e coerenti.

FIGURA 03 – P. 88

La definizione dei criteri di sostenibilità nel processo di conservazione ha consentito di approfondire e sviluppare, nell’ambito delle ricerche condotte all’Università Iuav di Venezia, un modello di analisi e valutazione del degrado e degli scenari operativi ad esso associati. Questo strumento consente di correlare specifiche tipologie di deterioramento con materiali e tecniche di conservazione adeguate, facilitando interventi mirati e sostenibili. Il modello propone criteri metodologici, ambientali, economici e gestionali per valutare compatibilità, efficacia e impatto dei materiali e delle tecniche impiegati nella pulitura e protezione delle superfici architettoniche. Questo approccio integrato supera la logica dell’intervento puntuale, promuovendo una visione globale in cui la sostenibilità non è un vincolo ma una risorsa progettuale. Il quadro metodologico si configura come uno strumento operativo per la definizione di strategie conservative che rispettino la materia esistente, garantendo al contempo tutela ambientale, sicurezza e ottimizzazione delle risorse. L’analisi prevede, in primo luogo, l’identificazione delle tipologie di alterazione o degrado e delle relative cause, al fine di identificare i materiali e le tecniche idonei a contrastare ciascun fenomeno. Il modello considera la natura del substrato, poiché le caratteristiche fisico-chimiche dei materiali influenzano sia i meccanismi di degrado sia l’efficacia degli interventi conservativi. Una valutazione specifica dell’intensità e dell’estensione del degrado è possibile solo in relazione a un caso studio concreto. Tale valutazione richiede un’analisi integrata del materiale e del suo stato di conservazione, con attenzione al grado di avanzamento di ciascun processo. La selezione dei materiali e delle tecniche si fonda sui principi di innovazione e sostenibilità, mirando a soluzioni efficaci, compatibili con il substrato e a basso impatto ambientale. Un elenco dettagliato dei componenti del modello mostra la relazione tra i fenomeni di Alterazione/Degrado (A/D), le caratteristiche del Supporto/Superficie (S), le Tecniche/Materiali (T/M) e i Criteri di Sostenibilità (C).

FIGURA 04 – P. 88

L’interrelazione tra i componenti del modello di analisi e valutazione dei fenomeni di degrado (A/D, S, T/M, C), sviluppato grazie alla collaborazione del gruppo di ricerca composto dall’Università Iuav di Venezia e da CO-RILA - Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia, è rappresentata nello schema seguente attraverso matrici che evidenziano le connessioni tra righe e colonne. L’assenza di relazione tra due componenti è indicata da una casella vuota; al contrario, la presenza di una relazione è segnalata da un apposito indicatore (Fig. 05). La lettura incrociata delle matrici consente di individuare le relazioni tra fenomeni di degrado, materiali costitutivi e tecniche di intervento, associando strategie conservative coerenti con le caratteristiche dei substrati e con i criteri di sostenibilità. L’efficacia delle soluzioni adottate può essere così valutata sia in funzione del tipo di deterioramento sia delle prestazioni richieste in termini ambientali. Una lettura estesa al contesto ambientale risulta fondamentale: ad esempio, la presenza simultanea di composti

microbici e biossido di titanio in presenza di croste o depositi (matrice A/D × T/M) suggerisce l'impiego di tecniche di biopulitura in situazioni in cui l'alterazione è prevalentemente superficiale. La figura 05, dunque, si configura come strumento operativo per la selezione e la valutazione mirata degli interventi conservativi, sulla base della caratterizzazione delle forme di degrado e della specificità dei materiali coinvolti.

FIGURA 05 – P. 89

Il modello si basa sull'analisi della letteratura scientifica di riferimento e sui dati tecnici forniti dalle aziende produttrici considerate nello studio, e contribuisce a definire scenari applicativi in cui i diversi componenti del modello possono essere integrati in un sistema coerente.

Gli scenari operativi che emergono dal modello consentono di leggere in modo integrato le proprietà, le formulazioni/tecnologie e le modalità applicative dei materiali e delle tecniche impiegate nei trattamenti di pulitura e protezione. Le schede relative a ciascuna tecnica/materiale illustrano anche i criteri di sostenibilità associati, valutati secondo modalità binarie ("sì"/"no"), parametrizzate ("basso", "medio", "alto") o, laddove le informazioni non siano disponibili o validate, tramite l'indicazione "ND" (non determinabile). Il criterio della "Riconoscibilità/Distinguibilità" è stato escluso in quanto non pertinente per le fasi di pulitura e trattamento protettivo; il parametro della "Durabilità" ha presentato limiti valutativi in fase di sperimentazione del modello: sebbene sia indicata ove l'informazione sia disponibile, non può essere garantita una performance superiore al decennio per la maggior parte dei materiali, molti dei quali sono ancora in fase di sperimentazione o di monitoraggio a lungo termine. Le figure 06, 07 e 08 mostrano alcuni degli scenari più rappresentativi del modello.

FIGURA 06 – P. 90

FIGURA 07 – P. 90

FIGURA 08 – P. 91

Il primo scenario riguarda l'impiego di gel, nanogel e reti polimeriche su materiali lapidei, in presenza di deposito o sporco superficiale. Le formulazioni selezionate evidenziano buone prestazioni in termini di selettività, bassa tossicità e compatibilità, con applicazioni semplici (es. tampone) e requisiti di sostenibilità generalmente soddisfatti.

Il secondo scenario si riferisce al biossido di titanio, applicato su supporti lapidei affetti da crosta nera, deposito e colonizzazione biologica. In questo caso emergono caratteristiche avanzate come fotoattività, effetto autopulente e proprietà antimicrobiche, sebbene alcuni parametri – come la durabilità a lungo termine – restino ancora non determinabili.

Il terzo scenario è relativo al trattamento di impregnazione idrofobica a base di silani e silossani, utilizzato per la protezione delle superfici in calcestruzzo soggette a fenomeni di efflorescenza e subflorescenza. Tra le proprietà rilevate emergono l'idrofobicità, la penetrazione profonda nel supporto e la trasparenza del prodotto, caratteristiche che ne garantiscono l'efficacia senza alterare l'aspetto del materiale trattato. Questa tecnologia offre tempi di applicazione ridotti, compatibilità e ritrattabilità delle superfici.

In conclusione, gli scenari operativi emersi dalla sperimentazione del modello evidenziano ampie potenzialità di applicazione di soluzioni innovative e sostenibili in casi specifici di degrado. Essi costituiscono anche una base per successive fasi di test e monitoraggio utili a una più precisa calibrazione delle strategie conservative e a una valutazione più affidabile dei materiali, in funzione degli obiettivi di compatibilità e sostenibilità nel medio-lungo periodo.

Riferimenti bibliografici

- Agency for Cultural Affairs, Government of Japan, Nara Prefecture et al. (2014) *Nara+20 sulla pratica del patrimonio, i valori culturali e il concetto di autenticità*. Incontro tenutosi a Nara, Giappone, 22-24 ottobre 2014.
- Aldosari, M.A., Darwish, S.S., Adam, M.A., et al. (2019) 'Using ZnO nanoparticles in fungal inhibition and self-protection of exposed marble columns in historic sites' in *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11, pp. 3407-3422. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0762-z>.
- Ausiello, G. (2018) 'Materiali innovativi e conservazione', in S. D'Agostino (a cura di) *Ingegneria e Beni Culturali*. Bologna: Il Mulino, pp. 465-522.
- Baglioni, M., Montis, C., Chelazzi, D., et al. (2018) 'Polymer Film Dewetting by Water/Surfactant/Good-Solvent Mixtures: A Mechanistic Insight and Its Implications for the Conservation of Cultural Heritage' in *Angewandte Chemie International Edition*, 57, pp. 7355-7359. Disponibile su: <https://doi.org/10.1002/anie.201710930>.
- Balaguru, P.N., Nazier, M., Arafa, M.D., et al. (2008) 'Field Implementation of Geopolymer Coatings, New Jersey Department of Transportation: Ewing Township'. Disponibile su: <https://cait.utrgers.edu/wp-content/uploads/2018/05/fhwa-nj-2002-011.pdf> (Ultimo accesso: 7 settembre 2025).
- Barone, G., Caggiani, M.C., Coccato, A., et al. (2016) 'Geopolymers: Innovative Green Materials for Cultural Heritage'. Presentato a *European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), AGM for CuHe Project*. Disponibile su: https://www.esrf.fr/files/live/sites/www/files/events/conferences/2020/Cultural%20Heritage/Abstract_Lanzafame.pdf?utm_source=chatgpt.com (Ultimo accesso: 7 settembre 2025).
- Becerra, J., Mateo, M., Ortiz, P., et al. (2019) 'Evaluation of the applicability of nano-biocide treatments on limestones used in cultural heritage' in *Journal of Cultural Heritage*, 38, pp. 126-135. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.010>.
- Beltrami, E., Berzioli, M., Cagna, M., et al. (2019) 'La pulitura dei dipinti murali: uno studio di applicabilità di sistemi tradizionali e sistemi addensati con gel acquosi di poliacrilato' in *Quaderni Cesmar 7*. Disponibile su: https://issuu.com/cesmar7/docs/quaderno_dro_completo (Ultimo accesso: 7 settembre 2025).
- Boccalon, E., Nocchetti, M., Pica, M., et al. (2021) 'Hydrogels: A 'stepping stone' towards new cleaning strategies for biodecorated surfaces' in *Journal of Cultural Heritage*, 47, 1-11. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.07.008>.
- Bosch-Roig, P., Lustrato, G., Zanardini, E., et al. (2015) 'Biocleaning of Cultural Heritage stone surfaces and frescoes: Which delivery system can be the most appropriate?' in *Annals of Microbiology*, 65, pp. 1227-1241. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s13213-014-0938-4>.
- Campostrini, A., Ghedini, E., Botrè, T., et al. (2025a) 'Engineered silica NPs to hold and release the antimicrobial product Biotin T' in *Next Materials*, 7, 100373. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100373>.
- Campostrini, A., Manente, S., Ghedini, E., et al. (2025b) 'Enhancing Venetian traditional marmorino with TiO₂ and ZnO for antimicrobial protection - A case study' in *Next materials*, 7, 100384. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100384>.
- Casaletto, M.P., Privitera, A., Cirrincione, C., et al. (2016) 'A hybrid organic-inorganic synthetic product for the conservation of stone materials: preliminary results'. IX Congresso Nazionale AIAR. Poster communication. Properties and Applications in Cultural Heritage in *Langmuir*, 36. Disponibile su: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00573>.
- Cavallaro, G., Milio, S., Lazzara, G. (2020) 'Halloysite Nanotubes: Interfacial Properties and Applications in Cultural Heritage' in *Langmuir*, 36, pp. 3677-3689. Disponibile su: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00573>.
- Christodoulou, C., Goodier, C., Austin, S., et al. (2013) 'Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane' in *Construction and Building Materials*, 48, pp. 708-716. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.038>.
- Coffetti, D., Crotti, E., Gazzaniga, G., et al. (2021) 'Protection of concrete structures: Performance analysis of different commercial products and systems' in *Materials*, 14, p.3719. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/ma14133719>.
- Colangiuli, D., Lettieri, M., Masieri, M., et al. (2019) 'Field study in an urban environment of simultaneous self-cleaning and hydrophobic nanosized TiO₂-based coatings on stone for the protection of building surface' in *Science of the Total Environment*, 650, pp. 2919-2930. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.044>.
- Croft, C., Macdonald S. (a cura di) (2018) *Concrete. Case studies in conservation practise*. Los Angeles: Getty.
- De Belie, N., Wang, J. (2015) 'Bacteria-based repair and self-healing of concrete' in *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 5, pp. 35-56. Disponibile su: <https://doi.org/10.1080/21650373.2015.1077754>.
- Di Biase, C. (a cura di) (2009) *Il degrado del calcestruzzo nell'architettura del novecento*. Rimini: Maggioli.
- Di Mundo, R., Labianca, C., Carbone, G., et al. (2020) 'Recent Advances in Hydrophobic and Icephobic Surface Treatments of Concrete' in *Coatings*, 10, p.449. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/coatings10050449>.
- Dong, Q., Gao, X., Wang, S., et al. (2023) 'Design and evaluation of an innovative composite silicate-based surface treatment agent for concrete' in *Case Studies in Construction Materials*, 18. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02207>.
- Elnaggar, E., Elsokkary, T.M., Shahide, M.A., et al. (2019) 'Surface protection of concrete by new protective coating' in *Construction and Building Materials*, 220. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.026>.
- European Committee for Standardization (CEN) (2004) *EN 1504-2: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Definitions, requirements, quality control, and evaluation of conformity - Part 2: Surface protection systems for concrete*. Bruxelles: CEN.
- Fidanza, M.R., Caneva, G. (2019) 'Natural biocides for the conservation of stone cultural heritage: a review' in *Journal of Cultural Heritage*, 38, pp. 271-286. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.01.005>.
- Franco-Castillo, I., Hierro, L., de la Fuente, J.M. et al. (2021) 'Perspectives for antimicrobial nanomaterials in cultural heritage conservation' in *Chem*, 7, pp. 629-669. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2021.01.006>.
- Giacobello, F., Ielo, I., Belhamdi, H., et al. (2022) 'Geopolymers and Functionalization Strategies for the Development of Sustainable Materials in Construction Industry and Cultural Heritage Applications: A Review' in *Materials*, 15, p. 1725. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/ma15051725>.
- Gherardi, F., Goidanich, S., Dal Santo, V., et al. (2018) 'Layered Nano-TiO₂ Based Treatments for the Maintenance of Natural Stones in Historical Architecture' in *Angewandte Chemie International Edition*, 57(25), pp. 7360-7363. Disponibile su: <https://doi.org/10.1002/anie.201712752>.
- Gherardi, F., Gulotta, D., Goidanich, S., et al. (2017) 'On-site monitoring of the performance of innovative treatments for marble conservation in architectural heritage' in *Heritage Science*, 5(1), p. 4. Disponibile su: <https://doi.org/10.1186/s40494-017-0118-5>.
- Gherardi, F., Maravelaki, P. N. (2022) *Conserving stone heritage, Traditional and Innovative Materials and Techniques*. Cham: Springer. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82942-1>.
- Granneman, S.J.C., Lubelli, B., van Hees, R.P.J. (2019) 'Mitigating salt damage in building materials by the use of crystallization modifiers - a review and outlook' in *Journal of Cultural Heritage*, 40, pp. 183-194. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.05.004>.
- Gulotta, D., Saviello, D., Gherardi, F., et al. (2014) 'Setup of a sustainable indoor cleaning methodology for the sculpted stone surfaces of the Duomo of Milan' in *Heritage Science*, 2. Disponibile su: <https://doi.org/10.1186/2050-7445-2-6>.
- Gupta, S., Ivvala, J., Grewal, H. S. (2021) 'Development of Natural Wax Based Durable Superhydrophobic Coatings' in *Industrial Crops and Products*, 171, 113871. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113871>.
- Husni, H., Nazari, M.R., Yee, H.M., et al. (2017) 'Superhydrophobic Rice Husk Ash Coating on Concrete' in *Construction and Building Materials*, 144, pp. 385-391. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.078>.
- International Council of Museums - Committee for Conservation (ICOM-CC) Task Force (2008) *Commentary on the ICOM-CC Resolution on Terminology for Conservation*, in Proceedings of the 15th Triennial Conference (New Delhi, 22-26 Settembre 2008) (Online Document). Disponibile su: <https://www.icom-cc.org/dlfile.aspx?file=https://www.icom-cc.org/docs/content/ICOM-CC-Resolution-on-Terminology-Commentary.pdf> (Ultimo accesso: 8 settembre 2025).
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (1964) *Carta di Venezia per la conservazione e il restauro dei monumenti e dei siti*.
- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (1994) *Documento di Nara sull'autenticità*. Disponibile su: <https://www.icomos.org/charters/nara-e.pdf> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).

- International Council on Monuments and Sites (ICOMOS) (2000) *Carta di Cracovia: principi per la conservazione e il restauro degli edifici storici*. Cracovia: ICOMOS.
- International Council on Monuments and Sites - International Scientific Committee for Stone (ICOMOS-ISCS) (2008) *Illustrated glossary on stone deterioration patterns* Disponibile su: https://openarchive.icomos.org/id/eprint/434/1/Monuments_and_Sites_15_ISCS_Glossary_Stone.pdf (Ultimo accesso: 8 settembre 2025).
- Jiang, C. (2020) 'A Review on Geopolymer in Potential Coating Application: Materials, Preparation and Basic Properties' in *Journal of Building Engineering*, 32, 101734. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101734>.
- Karapanagiotis, I., Hosseini, M. (2018) 'Superhydrophobic Coatings for the Protection of Natural Stone', in M. Hosseini, Karapanagiotis I (a cura di) *Advanced Materials for the Conservation of Stone* (1-25). Cham: Springer.
- Lazzarini, L., Tabasso, M. L. (2010) *Il restauro della pietra*. Torino: UTET.
- Lettieri, M., Masieri, M., Pipoli, M., et al. (2019) 'Anti-Graffiti Behavior of Oleo/Hydrophobic Nano-Filled Coatings Applied on Natural Stone Materials' in *Coatings*, 9, 740. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/coatings9110740>.
- Li, S., Jiang, J., Yongjuan, G. et al. (2024) 'Application of silane protective materials in the concrete durability improvement in recent years: A review' in *Engineering Failure Analysis*, 160. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108140>.
- Lubelli, B., Van Hees, R.P.J. (2010) 'Desalination of masonry structures: Fine tuning of pore size distribution of poultices to substrate properties' in *Journal of Cultural Heritage*, 11(1), 10-18. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.03.005>.
- Mastrangelo, R., Montis, C., Bonelli, N., et al. (2017) 'Surface cleaning of artworks: Structure and dynamics of nanostructured fluids confined in polymeric hydrogel networks' in *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19, pp. 23762-23772. Disponibile su: <https://doi.org/10.1039/C7CP02662E>.
- Ministero per i Beni Culturali e Ambientali (1972) *Carta italiana del restauro*. Roma: Ministero per i Beni Culturali e Ambientali.
- Morrisette, J.M., Carroll, P.J., Bayer, I.S., et al. (2018) 'Methodology to Produce Eco-Friendly Superhydrophobic Coatings Produced from All-Water-Processed Plant-Based Filler Materials' in *Green Chemistry*, 20, pp. 5169-5178. Disponibile su: <https://doi.org/10.1039/C8GC02439A>.
- Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L.F., Labrincha, J.A., et al. (2015) *Eco-efficient materials for mitigating building cooling needs: Design, properties and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.
- Pagnotta, S., Lluveras Tenorio, A., Tinè, M.R., et al. (2020) 'Geopolymers as a potential material for preservation and restoration of Urban Build Heritage: an overview' in *Earth and Environmental Science*, 609, 012057. Disponibile su: <https://arxiv.org/abs/2009.012057> (Ultimo accesso: 3 settembre 2025).
- Palla, F., Barresi, G. (2017) *Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage*. Cham: Springer.
- Palla, F., Bruno, M., Mercurio, F., et al. (2020) 'Essential oils as natural biocides in conservation of cultural heritage' in *Molecules*, 25, 730. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/molecules25030730>.
- Pan, X., Shi, Z., Shi, C., et al. (2017) 'A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms' in *Construction and Building Materials*, 132, pp. 578-590. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>.
- Piffaretti, P. (2018) *Conservazione del calcestruzzo armato a vista. Dal minimo intervento alla ricostruzione: analisi di casi studio*. Firenze: Nardini.
- Presentato, A., Armetta, F., Spinella, A., et al. (2020) 'Formulation of Mesoporous Silica Nanoparticles for Controlled Release of Antimicrobials for Stone Preventive Conservation' in *Frontiers in Chemistry*, 8, 699. Disponibile su: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00699>.
- Quagliarini, E., Bondioli, F., Goffredo, G.B. (2012) 'Self-cleaning and de-polluting stone surfaces: TiO2 nanoparticles for limestone' in *Construction and Building Materials*, 37, pp. 51-57. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.006>.
- Ranalli, G., Zanardini E. (2021) 'Biocleaning on Cultural Heritage: New Frontiers of Microbial Biotechnologies' in *Journal of Applied Microbiology*, 131, pp. 583-603. Disponibile su: <https://doi.org/10.1111/jam.14993>.
- Ranogajec, J., Rudic, O., Pasalic, S., et al. (2015) 'Pilot Scale Production and Compatibility Criteria of New Self-Cleaning Materials' in *International Scholarly and Scientific Research & Innovation*, 9(1). Disponibile su: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1337924>.
- Raudino, M., Selvolini, G., Montis, C., et al. (2015) 'Polymer Films Removed from Solid Surfaces by Nanostructured Fluids: Microscopic Mechanism and Implications for the Conservation of Cultural Heritage' in *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7, pp. 6244-6253. Disponibile su: <https://doi.org/10.1021/acsmi.5b00534>.
- Riedo, C., Caldera, F., Poli, T., et al. (2015) 'Poly(vinylalcohol)-borate hydrogels with improved features for the cleaning of cultural heritage surfaces' in *Heritage Science* 3(1), p. 23. Disponibile su: <https://doi.org/10.1186/s40494-015-0053-1>.
- Sarcinella, A., Frigione, M. (2023) 'Sustainable and Bio-Based Coatings as Actual or Potential Treatments to Protect and Preserve Concrete' in *Coatings*, 13, 44. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/coatings13010044>.
- Scappin, L., Campostrini, A., Zanardo, D., et al. (2022) 'Marmorino e fotocatalizzatori: un incontro tra tradizione e innovazione. International journal of architectural conservation and restoration'. Disponibile su: <https://intrecci.sirairestauroarchitettonico.it/index.php/intrecci/article/view/12> (Ultimo accesso: 5 settembre 2025).
- Schifano, E., Cavallini, D., De Bellis, G., et al. (2020) 'Antibacterial effect of zinc oxide-based nanomaterials on environmental biodegraders affecting historical buildings' in *Nanomaterials*, 10, 1-14. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/nano10020335>.
- Shen, L., Jiang, H., Wang, T., et al. (2019) 'Performance of silane-based surface treatments for protecting degraded historic concrete' in *Progress in Organic Coatings*, 129, pp. 209-216. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.01.016>.
- Sun, M., Zou, J., Zhang, H., et al. (2015) 'Measurement of reversible rate of conservation materials based on gel cleaning approach' in *Journal of Cultural Heritage*, 16, pp. 719-727. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.1.006>.
- Troiano, F., Gulotta, D., Balloi, A., et al. (2013) 'Successful combination of chemical and biological treatments for the cleaning of stone artworks' in *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, pp. 294-304. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.08.011>.
- UNESCO (1972) *Convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage (World Heritage Convention)*, adottata dalla Conferenza Generale nella sua diciassettesima sessione, Parigi, 16 novembre 1972. Disponibile su: <https://whc.unesco.org/en/convention/text/> (Ultimo accesso: 4 settembre 2025).
- Voltoлина, S., Aibéo, C., Cavallini, T., et al. (2016) 'Assessment of plasma torches as innovative tool for cleaning of historical stone materials' in *Journal of Cultural Heritage*, 2, 940-950. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.05.001>.
- Wang, Y., Zhang, Q., Li, P., et al. (2022) 'Durable and Sustainable Superhydrophobic Surface with Intertwined Cellulose/SiO2 Blends for Anti-Icing and Self-Cleaning Applications' in *Materials and Design*, 217, 110628. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110628>.
- Wu, X., Yang, F., Lu, G., et al. (2021) 'A Breathable and Environmentally Friendly Superhydrophobic Coating for Anti-Condensation Applications' in *Chemical Engineering Journal*, 412, 128725. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128725>.
- Zarzuola, R., Carbu, M., Gil, M.L.A., et al. (2019) 'Ormosils Loaded with SiO2 Nanoparticles Functionalized with Ag as Multifunctional Superhydrophobic/Biocidal/Consolidant Treatments for Buildings Conservation' in *Nanotechnology*, 30, 345701. Disponibile su: <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab1ff0>.
- Zhao, Y., Liu, Y., Liu, Q., et al. (2018) 'Icepophobic studies of superhydrophobic coatings on concrete via spray method' in *Materials Letters*, 233, pp. 263-266. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.008>.
- Zhong, X., Lv, L., Hu, H., et al. (2020) 'Bio-Based Coatings with Liquid Repellency for Various Applications' in *Chemical Engineering Journal*, 382, 123042. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123042>.

Note

1 Tra le aziende produttrici considerate nella ricerca si fa riferimento a Siltea (<https://www.siltea.eu/>), Nanotecnologie Italia (<https://nanotecnologieitalia.it/>), Biotitan nanotechnology (<https://biotitan.it/>), HMI High Materials Innovation (<https://www.high-materialsinnovation.com/>), Mapei (<https://www.mapei.com/it/it/home-page>) e Torggler (<https://www.torggler.com/it/it/>).

Criteri	Descrizione
Cultura del restauro	Principi e obiettivi dell'intervento
Compatibilità	Affinità chimico-fisica garantita dall'impiego di materiali simili a quelli originari per composizione, resistenza e caratteristiche di finitura superficiale
Minimo intervento	Necessità di limitare l'invasività delle azioni di restauro (fare quanto necessario e il meno possibile)
Reversibilità/Ritrattabilità	Possibilità di reintervenire con applicazioni conservative più idonee e aggiornate, anche sulla base di una programmazione
Selettività	Capacità di intervenire in modo controllato e preciso sui diversi strati della superficie, limitando l'azione ai materiali da rimuovere
Distinguibilità	Esigenza di rendere gli interventi di restauro e i nuovi materiali aggiunti chiaramente riconoscibili dalle parti originali
Sostenibilità ambientale	Pratiche che minimizzano l'impatto ambientale, conservano le risorse naturali e promuovono l'uso di materiali e tecniche a basso impatto
Disponibilità in natura/Regionalità	Possibilità di impiegare risorse naturali disponibili localmente
Risparmio energetico/Riduzione delle emissioni di CO ₂	Capacità di ridurre il consumo di energia e le emissioni di CO ₂ senza compromettere le prestazioni
Grado di tossicità	Capacità di causare danni alla salute umana o all'ambiente attraverso l'emissione di sostanze nocive durante e dopo l'applicazione
Sostenibilità economica e gestionale	Capacità di garantire la convenienza economica assicurando risorse adeguate per la manutenzione nel lungo termine
Durabilità	Capacità di resistere all'alterazione e al degrado
Costo del cantiere di restauro	Costi associati all'allestimento e alla gestione del cantiere di conservazione
Costo del processo di produzione	Costi associati alle materie prime, alla lavorazione e al trasporto
Tempo di esecuzione	Tempo richiesto per l'applicazione/posa in opera
Disponibilità sul mercato	Accesso immediato al prodotto e disponibilità

TABELLA 01

Criteri di individuazione e selezione di materiali e tecniche d'intervento nel restauro dell'architettura.

S. Di Resta, L. Rappa, 2024.



FIGURA 01

C. Scarpa, Memoriale Brion, San Vito di Altivole (Treviso).
Degrado delle superfici in calcestruzzo armato.
L. Rappa, 2019.



FIGURA 02

Efflorescenze saline su muratura in laterizio a Venezia.
L. Rappa, 2024.

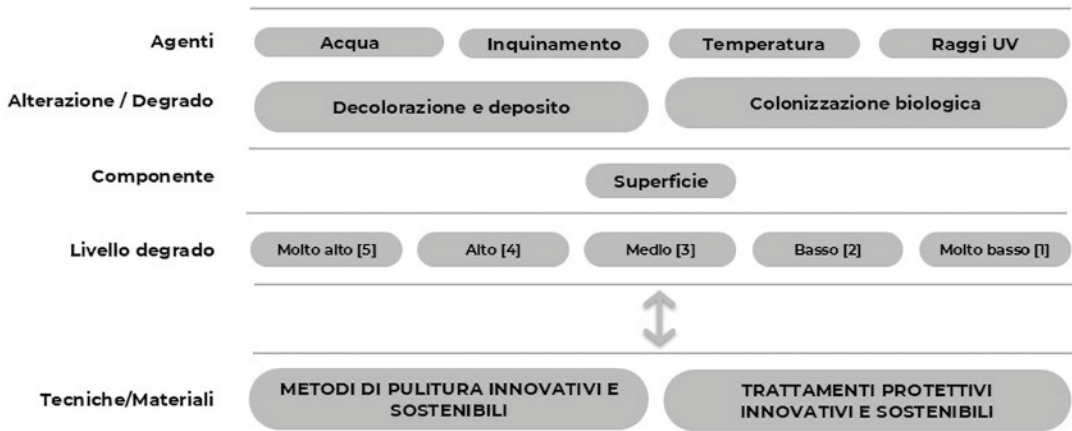


FIGURA 03

Modello di analisi e valutazione dei fenomeni di degrado: dagli agenti alle tecniche/materiali di conservazione.
S. Di Resta, L. Rappa, 2024.

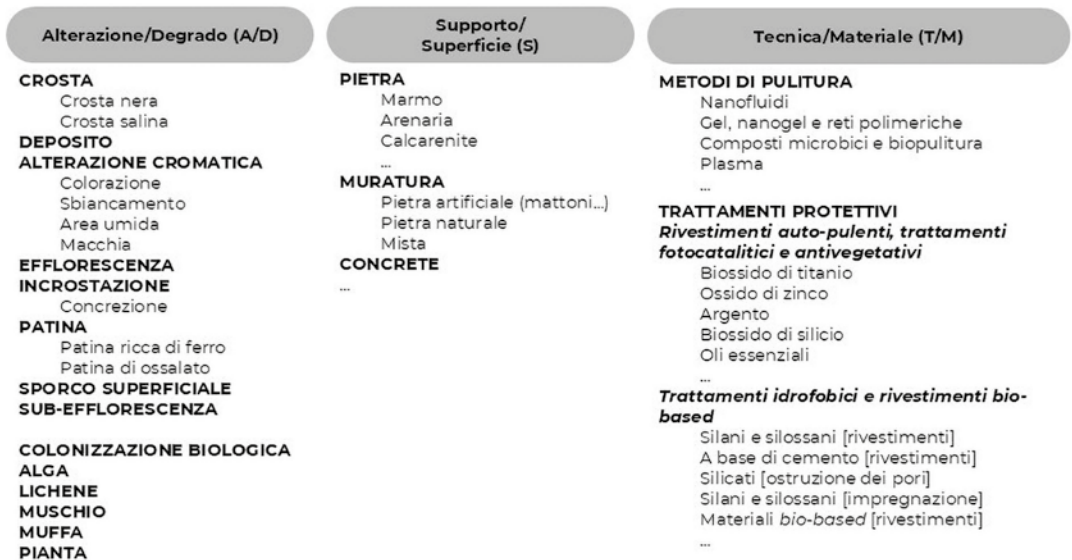


FIGURA 04

Componenti del modello di analisi e valutazione dei fenomeni di degrado.
S. Di Resta, L. Rappa, 2024.

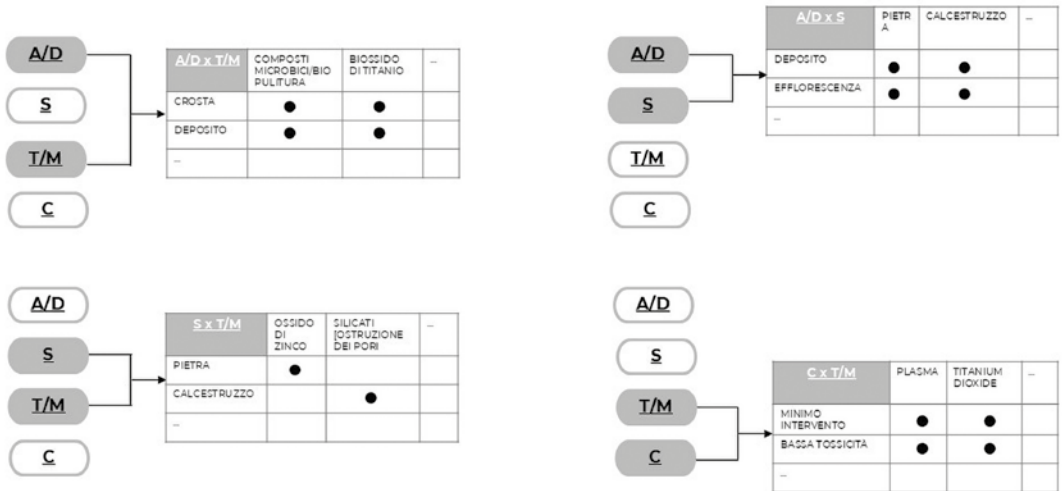


FIGURA 05

Interrelazione tra i componenti del modello di analisi e valutazione dei fenomeni di degrado.

S. Di Resta, L. Rappa, 2024

Criteria di sostenibilità (C)

CRITERI METODOLOGICI

- Compatibilità chimico-fisica-meccanica
- Minimo intervento
- Reversibilità/Ritrattabilità
- Selettività
- Riconoscibilità/Distinguibilità

SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE

- Tossicità
- Risparmio energetico/Riduzione emissioni di CO₂
- Disponibilità in natura/Regionalità

SOSTENIBILITÀ ECONOMICA E GESTIONALE

- Durabilità
- Costo del cantiere di conservazione
- Costo del processo di produzione
- Tempo di esecuzione
- Disponibilità sul mercato

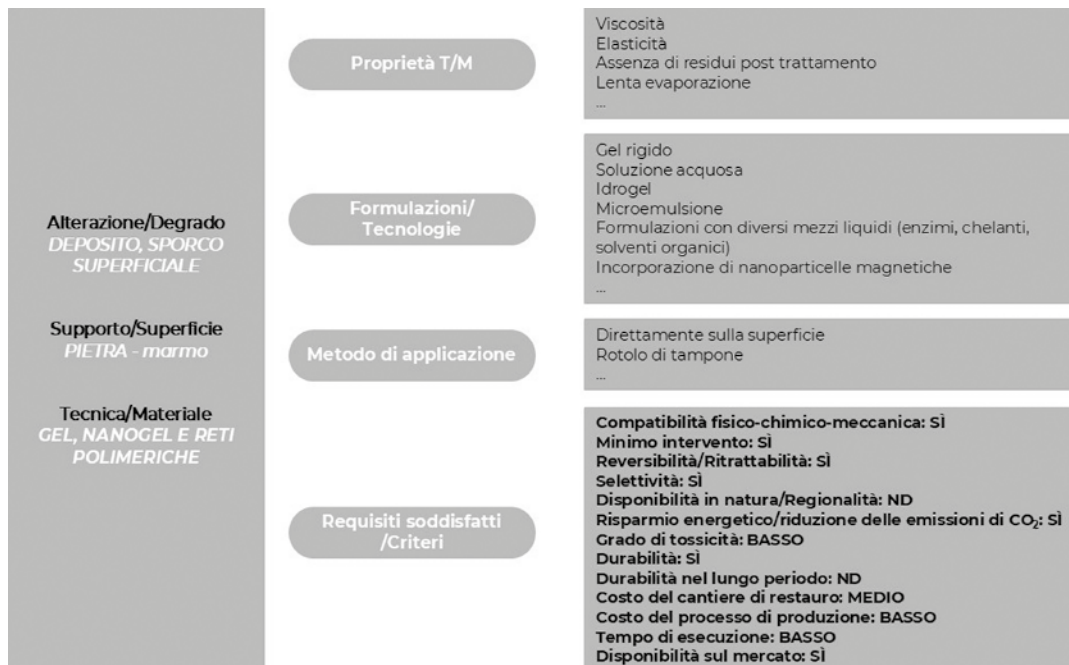


FIGURA 06

Scenario applicativo 1.
Metodi di pulitura.
S. Di Resta, L. Rappa, 2024.

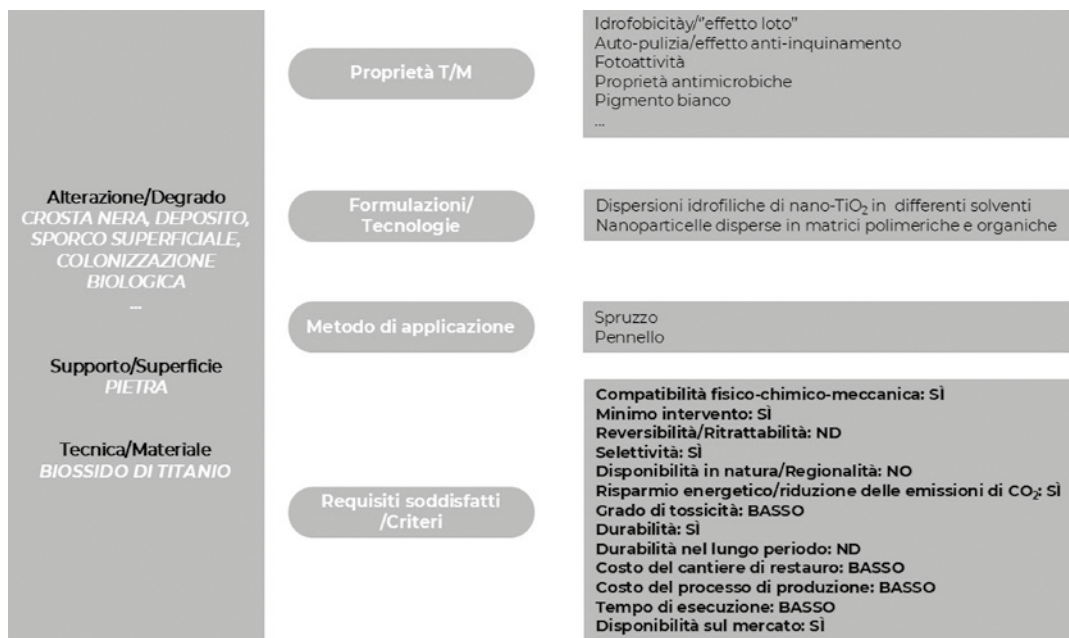


FIGURA 07

Scenario applicativo 2.
Trattamenti protettivi: rivestimenti autopulenti, trattamenti fotocatalitici e antivegetativi.
S. Di Resta, L. Rappa, 2024.

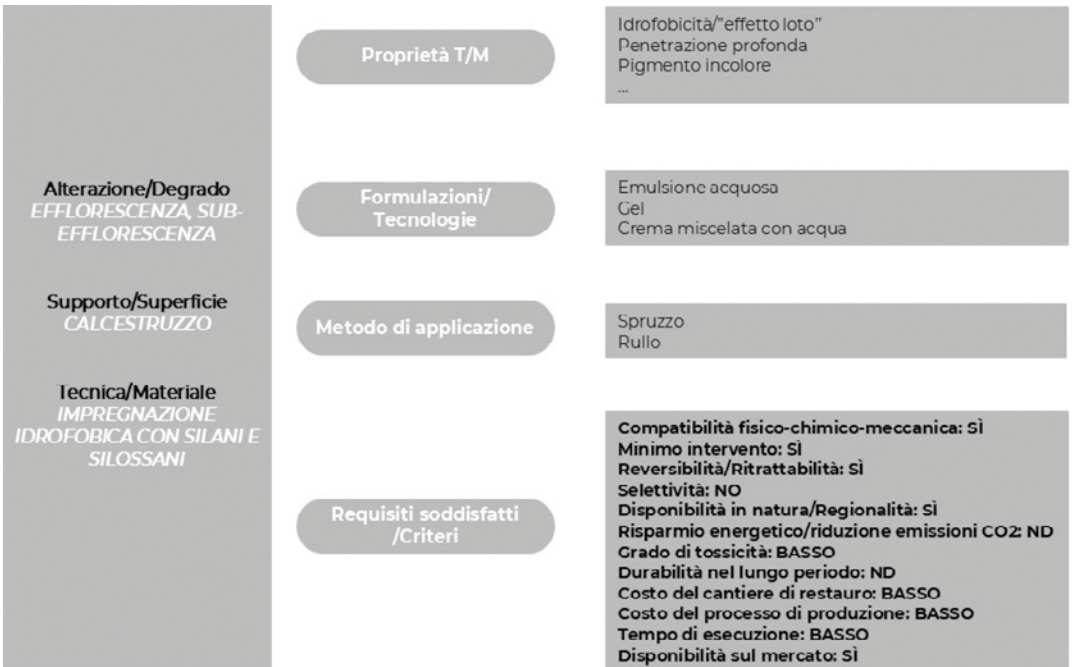


FIGURA 08

Scenario applicativo 3.
 Trattamenti protettivi: superfici idrofobiche e rivestimenti bio-based.
 S. Di Resta, L. Rappa, 2024.

Capitolo 3



Il restauro, attività regolata che mira alla conservazione delle architetture del passato, è di per sé una pratica sostenibile, perché orientata al mantenimento delle preesistenze, considerando rimozioni e aggiunte come azioni tendenzialmente residuali.

Scenari di intervento tra sicurezza, efficientamento e adaptive-reuse

Autore Francesco Trovò

Affiliazione Università Iuav di Venezia



Palazzo Ducale, Venezia.
Copertura.
F. Trovò, 2024.

Introduzione

Il restauro, attività regolata che mira alla conservazione delle architetture del passato, è di per sé una pratica sostenibile, perché orientata al mantenimento delle preesistenze, considerando rimozioni e aggiunte come azioni tendenzialmente residuali. Se si associa normalmente la pratica del restauro ai beni culturali, anche per altri edifici, non riconducibili a norme di tutela, ma comunque caratterizzati dalla presenza di molteplici valori (Spoormans e Pereira Roders, 2010), ci si può riferire ad analoghi criteri, con le dovute differenze, rendendo possibile raggiungere obiettivi di sostenibilità, come esito di scelte di progetto che massimizzano il recupero, limitando l'immissione nella filiera edilizia di ulteriori componenti e materiali, e di salvaguardia dei valori ritenuti rilevanti, con l'esclusione di manomissioni giustificate dalla transizione ecologica e dal riuso, tendenza che si sta diffondendo in alcune aree europee.

Nel continente gli edifici realizzati prima del 1945 sono circa il 25% del totale, mentre quelli ricompresi nel patrimonio culturale oscillano tra l'1 e il 5% (Litti, 2022, p. 25). Per questi ultimi, le modalità di tutela sono riferite al diritto di ciascuno Stato Membro; al contrario, per la parte preponderante del costruito – più di tre milioni di edifici solo in Italia secondo l'ISTAT –, le rilevanti differenze presenti richiederebbero quantomeno di individuare criteri di distinzione (Pickles e McCaig, 2017, pp. 10-16), prima di dare attuazione a strategie di riuso a diverse scale (Trovò, 2024, p. 28).

Gli obiettivi del *Green New Deal* suggeriscono anche per il Triveneto l'incremento di azioni di riqualificazione di ambiti degradati o non utilizzati, escludendo nuove espansioni urbane e periurbane, ma piuttosto attuando interventi di restauro o recupero delle diverse espressioni del patrimonio costruito, come l'edilizia storica di borghi e centri storici, l'edilizia rurale, il patrimonio militare e i siti produttivi dismessi, fino al patrimonio edilizio più recente, come dimostra l'attenzione a questi temi trattati nei contributi seguenti.

A questo contesto si integrano le previsioni della direttiva *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD IV Dir. 2024/1275) – da recepire entro il 29 maggio 2026 –, focalizzata sull'incremento dell'efficienza energetica e sulla riduzione delle emissioni nel settore edile, responsabile di circa il 40% del consumo finale di energia nell'Unione Europea, dove il 75% dell'intero stock edilizio risulta tuttora inefficiente dal punto di vista energetico.

La sfida posta è dunque complessa e ambiziosa e pone una serie di rischi. Innanzi tutto, l'applicazione delle deroghe individuate dalla EPBD IV per i Beni Culturali potrebbe finire per disincentivare gli sforzi per la definizione di interventi compatibili con la tutela, vanificando anche il ruolo

esemplare che essi possono assumere per il resto dell'edilizia; va poi considerato che, in assenza di specifici indirizzi, molti degli interventi per la restante parte del costruito potrebbero risultare – come peraltro dimostrato dalla stagione dei bonus – nettamente sbilanciati verso criteri ambientali, con effetti negativi sulle qualità degli stessi manufatti e del paesaggio. Infine, andrebbero contemplate anche le esigenze legate alla sicurezza del costruito, le quali, oltre a riguardare le minacce ben note del rischio sismico e del fuoco, oggi vanno estese anche agli effetti del cambiamento climatico, richiedendo una visione di sistema per ottimizzare le risorse culturali e patrimoniali disponibili.

Riferimenti bibliografici

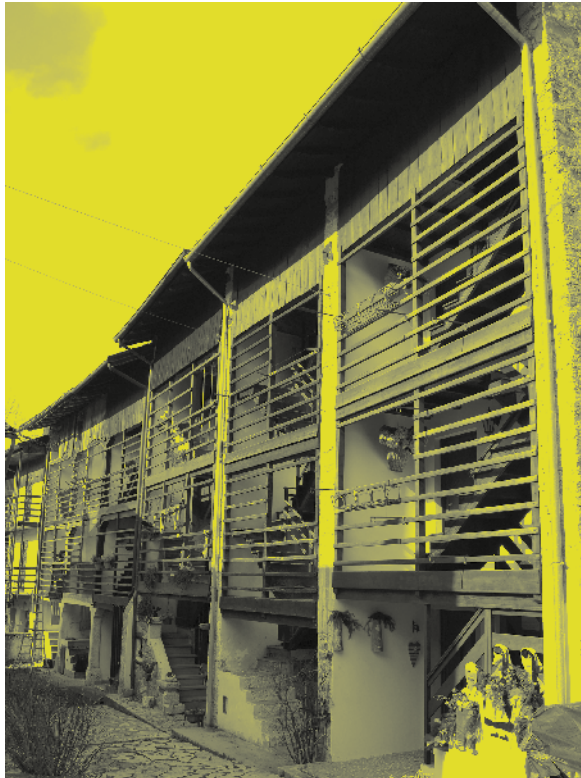
- Litti, G. (2022) 'Direttive europee e prestazione energetica. Quali cambiamenti per gli edifici storici?', in *Recupero e Conservazione Magazine*, 169, pp. 22–29. Disponibile su: https://www.researchgate.net/publication/358940418_Direttive_Europee_e_prestazione_energetica_quali_cambiamenti_per_gli_edifici_storici (Ultimo accesso 8 agosto 2025).
- Pickles, D., McCaig, I. (2017) *Energy Efficiency and Historic Buildings*. Londra: Historic England.
- Spoormans, L., Pereira Roders, A. (2020) 'Methods in assessing the values of architecture in residential neighbourhoods', in *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 10. Disponibile su: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-10-2019-0095>.
- Trovò, F. (2024) 'L'edilizia storica oggi. Norme e strumenti per una tutela che cambia', in Magni F., Manzelle M. e Trovò F. (a cura di) *Patrimonio costruito e riuso. Strategie, strumenti e processi*. Padova: Il Poligrafo, pp. 15-34.

Autori

Alessandra Biasi
Margherita Pauletta
Isabella Zamboni
Giada Frappa

Affiliazione

Università degli Studi
di Udine



Andreis (PN).
Esempio di tipo abitativo a schiera con Daltz, prospetto sud.
I. Zamboni 2025.

Applicazione del modello di valutazione multirischio al centro abitato di Andreis (Pordenone)

UNA METODOLOGIA PER L'ANALISI DEI RISCHI IN VISTA DI MISURE DI PROTEZIONE DEI DALTZ

L'applicazione del modello di analisi multirischio al nucleo abitato di Andreis¹ condotta dall'Università degli Studi di Udine² si colloca nel quadro degli scenari di intervento, incentrati sullo sviluppo di una metodologia di analisi dei rischi e correlate misure di mitigazione, profilati nell'ambito della ricerca condotta all'interno del progetto PNRR, iNEST-Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 - City, Architecture, Sustainable Design, RT2 - Heritage, recovery, conservation³. Tale ricerca, in uno sguardo di largo respiro, ne ha saldato le prerogative alle prescrizioni di protezione e salvaguardia del patrimonio culturale a rischio, conforme ad un approccio sostenibile e integrato, rispettoso della ricchezza e dell'articolazione dei diversi ecosistemi presenti nei territori del Nord-Est. Un patrimonio insediativo composito, dunque, le cui qualità - laddove opportunamente riconosciute, preservate e gestite - rappresentano una risorsa preziosa sul fronte della coesione sociale e dell'implementazione del sistema economico nel suo insieme. Si tratta di risorse non permanenti, oggi come nel passato suscettibili al rischio di eventi estremi (terremoti, inondazioni, incendi); emblematico è il caso del Comune di Andreis, distrutto a più riprese da terremoti e incendi nel corso dei secoli. Ciò a sottolineare l'importanza dell'identificazione di strumenti e strategie di protezione idonee a ridurre la vulnerabilità e aumentare la resilienza del patrimonio architettonico locale, nella fattispecie i Daltz che ne rappresentano tradizionalmente le peculiarità (Chinellato e Crotto, 2002; Petriccion *et al.*, 2020)⁴, viepiù nel contesto di cambiamento climatico destinato ad accentuare la pressione dei fenomeni di pericolo entro l'assetto idro geomorfologico del territorio (Biasi *et al.*, 2024). Occorre ricordare in proposito che il territorio di Andreis, esteso entro la vallata prealpina delimitata a nord dai profili montuosi culminanti nella cima del monte Raut (2000 m s.l.m.) e attraversata dai torrenti Alba e Molassa, è caratterizzato dal digradare in direzione sud-ovest dei rilievi montani in terrazzamenti e versanti a morfologia dolce, soggetti ad instabilità franose, in cui si insediano storicamente i nuclei abitati (Bosplans, Prapiero, Alcheda, Sott'Anzas, Andreis capoluogo).

FIGURA 01 – P. 108

Per inquadrare, nonché valutare, l'applicazione del modello multirischio al nucleo abitato di Andreis occorre richiamare la metodologia di analisi dei rischi che, opportunamente correlata a specifici insiemi di MTTM

(Metodologie, Tecnologie, Tecniche, Materiali), profila un approccio strutturato sul piano della mitigazione, adattamento e/o miglioramento dei pericoli e vulnerabilità che investono il patrimonio entro il panorama urbano e architettonico del Nord-Est nel suo complesso. Un'opportunità che in quest'ottica e prospettiva trova implementazione applicativa nel nucleo abitato di Andreis, il cui patrimonio culturale come accennato non è esente da rischi estremi di origine naturale di cui gli strumenti di rilevazione messi appunto offrono un quadro sistematico per singoli eventi (terremoto, inondazioni, fuoco)⁵.

In tale scenario e ancorché allo stato dell'arte delle indagini relative alla vulnerabilità del nucleo di Andreis⁶, il modello multirischio costituisce uno strumento di analisi e valutazione innovativo che consente di fare nuova sintesi dei dati disponibili, via via incrementabili. Ciò a partire dall'indirizzo metodologico della ricerca che muove a monte da alcuni passaggi chiave: l'adozione di un modello basato sui macro-eventi (alluvioni, terremoti, isole di calore urbane e necessità di efficientamento energetico, incendi) di ogni fenomeno, alla luce della mappatura dei rischi su scala regionale e locale, vengono indagate caratteristiche e localizzazione territoriale degli impatti a scala urbana e architettonica; la ricezione del rischio in chiave di azione simultanea di più eventi (approccio multirischio) tramite l'adozione di modelli e strumenti mirati; la lettura integrata tra fenomeno/evento e deterioramento/danno laddove la metodologia per l'analisi dei rischi fornisce lo scenario di riferimento a supporto dell'attuazione delle misure tutela del patrimonio architettonico; la determinazione dei pericoli e vulnerabilità del sito e dei componenti dell'edificio tramite opportuni strumenti di conoscenza, valutazione e applicazione orientati all'individuazione del sistema di MTTM più appropriato in vista di azioni di miglioramento/adequamento.

Sono questi criteri metodologici, ripresi e implementati nell'applicazione del modello di analisi al nucleo abitato di Andreis, a consentire l'avvio di una formulazione strutturata, in chiave multirischio, dei pericoli legati ai macro-eventi che investono il patrimonio architettonico locale⁷. Si profilano così, conforme ai parametri assegnati alla vulnerabilità del patrimonio e del territorio, concreti scenari di intervento in vista di misure di protezione aderenti alle istanze della conservazione preventiva e programmata attorno a cui si è avviato un confronto con l'Amministrazione locale (Della Torre, 2003; Moiola, 2023). In particolare, si rileva come la fase analitica del modello di rischio assuma un ruolo dirimente laddove il vaglio della pericolosità sismica, in relazione alla vulnerabilità formale e strutturale, si salda alla conoscenza peculiare di tipologia, planimetria, materiali, caratteri costruttivi e interventi di miglioramento sismico in essere⁸.

FIGURA 02 – P. 109

FIGURA 03 – P. 110

Ne esce in questo contesto una visione a tutt'oggi inedita dello stato del singolo caso studio che, opportunamente estesa ad includere l'intero patrimonio, potrà svolgere un ruolo guida nel processo decisionale futuro.

Detto ciò, nel corso della ricerca l'articolazione delle fasi costruttive dei Daltz si è rivelata più complessa di quanto sino ad oggi stimato e anche l'applicazione di tecniche di intervento post terremoto non risulta sempre rispondente ad un criterio di uniformità entro organismi tipologicamente affini ma distinti sotto il profilo storico costruttivo (Gentili e Croatto, 2008). Ciò suggerisce cautela nella generalizzazione dei dati desunti dall'applicazione del modello al caso studio, di cui si è testata l'efficacia metodologica non già, allo stato attuale dell'indagine, l'entità delle peculiari differenze insite in ogni singola fabbrica. Ma, come ricordato, si tratta dell'avvio di uno studio di ricerca ancora in fieri.

CLASSIFICAZIONE DELLA TIPOLOGIA STRUTTURALE DEGLI EDIFICI

È stato effettuato un rilievo speditivo della tipologia strutturale degli edifici, prevalentemente residenziali, presenti nel comune di Andreis. A valle del rilievo, quasi tutti gli edifici, per la precisione 466, sono stati classificati secondo le seguenti tipologie:

MAS 1: pareti portanti in muratura di pietra per le strutture verticali, travi e assi di legno per solai e copertura, edificio senza balcone.

MAS 2: pareti portanti in muratura di pietra per le strutture verticali, travi e assi di legno per solai e copertura, edificio con balcone.

MAS 3: pareti portanti in muratura di pietra per le strutture verticali, travetti e soletta superiore in calcestruzzo armato (c.a.) con elementi di alleggerimento in laterizio per solai e copertura, edificio con o senza balcone.

MAS 4: pareti portanti in muratura di mattoni ed eventualmente pilastri in c.a. per le strutture verticali, travetti e soletta superiore in c.a. con elementi di alleggerimento in laterizio per solai e copertura, edificio con o senza balcone.

RC 1: pareti e pilastri in calcestruzzo armato per le strutture verticali, travetti e soletta superiore in c.a. con elementi di alleggerimento in laterizio per solai e copertura, case a schiera con balcone.

FIGURA 04 – P. 111

In Tabella 01 sono stati riportati i risultati della classificazione effettuata. Dalla tabella si osserva che le tipologie edilizie più comuni in Andreis sono MAS 1 e MAS 2. In particolare, la tipologia MAS 2, rappresentando i cosiddetti Daltz, ha rilevante importanza storico-culturale, in quanto rappresentativa del patrimonio delle tecniche costruttive del paese. Per queste ragioni, la presente ricerca considera, come caso studio, un edificio appartenente a tale tipologia.

TABELLA 01 – P. 110

ANALISI DEL RISCHIO PER IL CASO STUDIO CONSIDERATO

Terremoto

Pericolosità sismica

La scheda multirischio prevede una valutazione iniziale della pericolosità regionale e locale, attraverso la valutazione delle condizioni geologiche e geosismiche generali e locali del sito e del contesto architettonico-urbano. Si fa presente che, secondo la *Mappa di Rischio Sismico* dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV, 2006), il territorio italiano è suddivisa in zone con 4 diversi livelli di sismicità, secondo il valore di un unico parametro di riferimento a_g , corrispondente al picco di accelerazione su terreno roccioso e configurazione topografica pianeggiante. Per gli stati limite di salvaguardia della vita, è determinata la seguente classificazione: in Zona 1 si ha $a_g > 0,25g$; in Zona 2, $0,15g < a_g < 0,25g$; in Zona 3, $0,05g < a_g < 0,15g$; e in Zona 4, $a_g < 0,05g$, dove g rappresenta il valore dell'accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$). Siccome per il comune di Andreis si ha $a_g > 0,25g$, esso ricade nella zona di più elevata sismicità italiana (Zona 1). In termini di intensità sismica e macrosismica, dal *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani* dell'INGV (Rovida *et al.*, 2022) risulta che l'intensità del terremoto più gravoso, con epicentro a meno di 20 km di distanza, a cui è stato soggetto Andreis, è stata di 6.5 gradi della scala Richter, cui corrisponde un

grado della scala Mercalli MCS>IX. Inoltre, la *Relazione Illustrativa della Microzonazione Sismica del Comune di Andreis* (Bincoletto e Riccio, 2019) evidenzia la presenza, sotto il paese, di terreni costituiti da ghiaie, sabbie e limi di origine morenica, che possono determinare ulteriori amplificazioni, di entità anche elevata, dell'intensità sismica.

Dal punto di vista del contesto architettonico-urbano, il centro abitato di Andreis non è esteso in pianta, ma presenta un'elevata densità edilizia, con molti edifici addossati o a breve distanza tra loro. Le vie di accesso agli edifici sono generalmente piuttosto strette, poiché dimensionate in epoca antecedente alla diffusione delle automobili. L'edificio considerato come caso studio è situato nel centro del paese.

Tenendo conto delle evidenze sopra descritte, il rischio sismico regionale è risultato molto alto, pari al 93%, e quello locale alto, pari all'80%, come si può rilevare dai dati riportati nella Figura 05, che riassume i pesi dei parametri utilizzati per la valutazione.

Vulnerabilità formale

Per la valutazione della vulnerabilità formale dell'edificio, la scheda multi-rischio tiene conto dei seguenti aspetti:

- le configurazioni planimetrica e altimetrica e il loro essere favorevole o meno a contrastare un terremoto;
- la presenza di volumi aggregati, come portici, logge, terrazze sospese;
- la presenza di edifici adiacenti che possano mitigare l'impatto del sisma;
- gli elementi non strutturali e la loro capacità di sopportare un terremoto: comignoli, cornicioni, controsoffitti, infissi, appendici, arredi, oggetti interni ed esterni che possono causare danni con la loro caduta.

FIGURA 06 – P. 113

Le configurazioni planimetrica e altimetrica del caso studio sono visibili nelle Figure 06a e 06b. L'edificio si eleva per tre piani, comprensivi del sottotetto, e ha pareti portanti in muratura di pietra disposte lungo le due direzioni principali, due pareti in direzione nord-sud e tre in direzione est-ovest. Queste ultime hanno una lunghezza complessiva maggiore di quella delle prime. La pianta dell'edificio non è simmetrica rispetto all'asse nord-sud, a causa dell'arretramento della parete ovest rispetto alla facciata (Fig. 06a). Le aperture, costituite da porte e finestre, sono allineate in elevazione nelle pareti nord, sud e ovest. Rispetto ai piani superiori, nelle pareti sud e ovest è presente un'apertura aggiuntiva al piano terra. A questo livello le aperture occupano circa 1/5 della parete sud e 1/3 della parete ovest. In corrispondenza del piano sottotetto (terzo piano) la parete ovest è assente ed è sostituita da un tamponamento costituito da un paramento ligneo allineato alla facciata (Fig. 06b). Pertanto, rigidità e resistenza delle pareti sud e ovest sono inferiori al piano terra rispetto ai piani superiori. Nella parete est le aperture sono piccole, ma non allineate in altezza, riducendo così l'ampiezza della porzione resistente di muratura. Su tale parete si rileva anche la presenza di una preesistente apertura ad arco, poi tamponata, e di un parziale taglio nel muro per l'inserimento di impianti. Tuttavia, entrambi gli interventi si trovano sotto finestre e quindi non vanno ad influire sulla resistenza dei maschi murari. La configurazione delle strutture verticali descritta comporta un'eccentricità tra centro di massa e centro di rigidità dell'edificio di circa 1 m in direzione est-ovest al primo e secondo piano, leggermente maggiore al piano terra, per la presenza delle aperture più estese nella parete ovest, e di circa 2,5 m al

terzo piano, per l'assenza della parete ovest. Dal punto di vista della vulnerabilità formale, tale configurazione determina un comportamento torsionale dell'edificio sotto azione sismica, particolarmente accentuato all'ultimo piano. Tale comportamento produce spostamenti e quindi sollecitazioni agiuntive nelle porzioni di parete più lontane dal centro di rigidità.

Si evidenzia che le porzioni murarie che sorreggono balcone e scala sono state aggiunte successivamente rispetto al nucleo chiuso, che è stato costruito per primo, come si deduce dalla presenza di una linea di discontinuità all'intersezione di queste porzioni di parete con il nucleo (Fig. 06c). Esse, tuttavia, sono collegate tra loro nella direzione nord-sud, mediante travi d'acciaio e tiranti disposti al livello dei solai, e al nucleo chiuso nella direzione est-ovest, mediante tiranti.

Esternamente, la struttura non è collegata ad altre costruzioni. È, invece, presente una canna fumaria, addossata e non ammorsata alla parete est. Si tratta di un elemento che potenzialmente, sotto azione sismica, potrebbe staccarsi e crollare. Anche il comignolo servito dalla canna fumaria potrebbe andare soggetto a ribaltamento.

Tenendo conto delle caratteristiche dell'edificio rilevate e sopra descritte, la vulnerabilità formale è stata valutata come alta, pari all'80%, come si può rilevare dai dati riportati nella:

FIGURA 05 – P. 112

Vulnerabilità strutturale

Per la valutazione della vulnerabilità strutturale dell'edificio, la scheda multirischio tiene conto principalmente dei seguenti aspetti:

- configurazione strutturale e tipologia dei materiali costituenti la struttura portante;
- qualità e stato di conservazione della tessitura muraria e della malta, grado di levigatura delle pietre naturali, presenza di collegamenti parete-parete (efficacia dei cantonali), adozione di sistemi come tiranti antiespulsivi, ristilatura dei giunti, iniezioni leganti, intonaci armati, interventi cuci-scuci;
- condizioni di degrado e/o dissesto e interventi di miglioramento sismico eseguiti su strutture verticali, orizzontali, fondazioni, scale, copertura;
- presenza di collegamenti tra gli elementi strutturali, come tiranti, catene, contrafforti, cerchiature, cordoli, ancoraggi;
- configurazione delle strutture orizzontali dei solai per valutare effetti di martellamento con le pareti con conseguente ribaltamento delle stesse al di fuori del piano.

Le pareti in muratura dell'edificio costituiscono le strutture sismo-resistenti e, contemporaneamente, le strutture che reggono i carichi verticali trasferiti da solai e copertura. La tessitura muraria delle pareti è irregolare (Fig. 06c), con elementi di pietra di dimensioni molto variabili, da pochi centimetri fino a 20-30 cm. Anche i letti di malta hanno spessori irregolari. Le dimensioni dei cantonali sono variabili, tuttavia il grado di ammorsamento tra muri perpendicolari appare sufficiente. Nel 1980 è stata eseguita la ristilatura dei giunti di malta, che appaiono ancora in un discreto stato di conservazione. Sono inoltre stati eseguiti interventi cuci-scuci, in corrispondenza di lesioni. Non sono stati invece effettuati interventi, come l'intonaco armato, che avrebbero potuto innalzare la resistenza delle pareti. La copertura è stata dotata di cordoli di sottotetto e sono stati ripristinati gli elementi del tetto che erano ammalorati. Non sono stati effettuati

interventi sulle fondazioni, che, con ogni probabilità, non hanno allargamento fondale. Le scale esterne dell'edificio sono in legno, a parte al piano terra, dove sono in muratura. Nel 1980 sono state realizzate scale a chiocciola interne in legno, con opportuno collegamento delle travi portanti alle pareti. Le scale in legno hanno solo la funzione di portare i carichi verticali, mentre, per quanto riguarda l'azione sismica, non offrono alcun contributo, avendo una rigidità trascurabile. Infine, sono stati effettuati interventi di sostituzione degli architravi delle porte, originariamente in legno, con nuova realizzazione in c.a.

Allo stato attuale non si segnalano evidenti fenomeni di dissesto degli elementi strutturali dovuti a sismi recenti. Piccole evidenze di degrado sono l'erosione superficiale delle pietre con minore compattezza, come quelle in arenaria, e qualche fessurazione da ritiro nei giunti di malta. Tuttavia, complessivamente, l'edificio appare in buone condizioni di conservazione. Ai fini della valutazione del comportamento globale della struttura per la resistenza sismica, si fa osservare che la dimensione minore dell'edificio in pianta è di circa 6 m e l'altezza del colmo è di circa 10 m; quindi, la sua configurazione non è particolarmente snella. Il comportamento dell'edificio, inoltre, può essere considerato sufficientemente scatolare, grazie alla realizzazione nel 1980 dei seguenti interventi di miglioramento sismico:

- tiranti nelle due direzioni principali ai livelli dei solai, in particolare in direzione nord-sud al secondo e terzo piano e in copertura, e in direzione est-ovest al primo e terzo piano;
- cordoli in c.a. inseriti nelle murature ai livelli dei solai e del sottotetto (Fig. o6d);
- soletta in calcestruzzo armato realizzata al di sopra del solaio in legno e collegata ai cordoli di piano tramite ammorsamenti a coda di rondine (Fig. o6d). Grazie a tali ammorsamenti non possono esserci martellamenti tra le pareti e la soletta stessa, anzi essa tenderà a trattenere eventuali ribaltamenti fuori piano delle pareti. Non sono stati tuttavia realizzati collegamenti tra le soletta e le travi che la sostengono; quindi, la soletta non può essere considerata collaborante con le travi al fine di portare i carichi verticali, ma costituisce un peso aggiuntivo;
- controventi diagonali in acciaio realizzati al di sopra del solaio in legno, annessi nella soletta in c.a. e ammorsati ai cordoli perimetrali in c.a.

Sulla base delle caratteristiche strutturali dell'edificio e degli interventi di miglioramento sismici rilevati, la vulnerabilità strutturale è stata valutata come medio-alta, pari al 64%, come si può rilevare dai dati riportati nella:

FIGURA 05 – P. 112

Esposizione

La scheda multirischio prevede anche una valutazione dell'esposizione dell'edificio e dei beni/persona in esso contenuti, tenendo conto principalmente dei seguenti aspetti:

- le funzioni e il relativo livello di affluenza in base alla sua natura pubblica o privata dell'edificio stesso;
- i percorsi di evacuazione.

Ai fini della valutazione dell'esposizione si fa osservare che l'edificio ha funzione abitativa ed è costituito da due unità immobiliari. Ogni unità è dotata di due percorsi di evacuazione, uno esterno, attraverso le scale in

legno dei ballatoi, e uno interno, attraverso la scala a chiocciola. Sulla base di tali informazioni si è valutata l'esposizione come medio-bassa, pari al 40%, come si può rilevare dai dati riportati nella:

FIGURA 05 – P. 112

Alluvione

Per poter valutare il rischio alluvione, il modello ha indotto la presa in esame delle condizioni geomorfologiche e idrografiche (regionali e locali) del territorio di Andreis. Due sono, in sintesi, i sistemi di appartenenza: le Prealpi Carniche con gli specifici suoli e le faglie attive e capaci (Carulli, 2006; Scortegagna e Zanetti, 2008), e il bacino del fiume Livenza. Il paesaggio naturale della Valcellina è notoriamente e profondamente mutato nel corso del tempo in virtù dello sfruttamento idrico: l'omonimo fiume, infatti, da via di trasporto per l'approvvigionamento di legname grezzo, divenne risorsa per la produzione di energia a partire dalla fine del XIX secolo (Valussi, 1963, pp. 83-99). L'attuale sistema di centrali idroelettriche, in funzione a partire dal 1988 e caratterizzante l'efficiente rete idrografica regionale, comprende: quelle di Barcis, San Foca e Villa Rinaldi; diga di Ponte Antoi (anni '50); il bacino di accumulo presso le strette di Ravedis (prima piena 2014) e tre impianti più recenti lungo i corsi Cellina, Ponte Giulio, San Leonardo e Cordenons (Chinnellato e Petriccione, 2019).

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), nell'ambito dei propri compiti istituzionali, opera la raccolta, elaborazione e diffusione dei dati in materia di difesa del suolo e dissesto idrogeologico del territorio nazionale (artt. 55 e 60 del D.Lgs. 152/2006 *Norme in materia ambientale*). In particolare, fornisce mosaicature di pericolosità, realizzate sulla base dei *Piani di Assetto Idrogeologico – PAI Frane* e delle mappe di pericolosità idraulica, che, secondo gli scenari del D. Lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva Alluvioni (2007/60/CE), tengono conto degli aggiornamenti provenienti dalle Autorità di Bacino Distrettuali (ISPRA e SNPA, 2021). Pertanto, la consultazione della piattaforma multimediale *IdroGEO* (ISPRA 2025) è fondamentale per la presa in esame di dati su pericolosità e altri indicatori di rischio. In particolare, il *Piano di Assetto Idrogeologico* (2020) tiene conto anche dell'elevata piovosità del centro abitato di Andreis e riporta la perimetrazione di 17 zone specifiche con relative classi di pericolosità, dissesti da frana e categorie di rischio. In un solo caso è individuata una zona a pericolosità geologica «molto elevata» nelle pertinenze occidentali dell'insediamento, mentre altre pericolosità «elevate» si trovano nelle immediate vicinanze a est e a ovest. Lungo lo sviluppo a sud della terrazza e della strada di accesso è presente una zona di pericolosità «media» che potrebbe ostacolare anche l'arrivo di ulteriori mezzi di soccorso. Per la valutazione di questo parametro il modello richiede anche informazioni sulla precipitazione media annua che, in base ai dati della rete meteorologica regionale 1991-2020 (ARPA FVG, 2023, p. 12), risulta essere «elevata» (1.800-2.100 mm). La valutazione complessiva degli indicatori di pericolosità regionale e locali sono stati conseguentemente stimati dal sistema di calcolo come medio-alti pari al 60% e 70%.

Richiamando, poi, le caratteristiche costruttive descritte nel precedente paragrafo (spessore e tecnica esecutiva delle murature al piede, trasformazioni, consolidamenti progressivi...), nonché lo stato di conservazione dell'edificio in esame, è stato in via speditiva assegnato il valore medio-basso (pari al 40%) al parametro vulnerabilità strutturale (Fig. 06b e c). Relativamente alla vulnerabilità formale è stato necessario considerare l'esistenza di sistemi di protezione del caso studio (di media efficienza in virtù di un'opera di iniziativa privata per lo smaltimento delle acque piovane sul

lato ovest) e l'eventuale presenza di beni in piani interrati (assenti), ciò ha determinato una valutazione medio-bassa pari al 40% (Fig. 05). I valori del parametro esposizione sono conformi a quanto dichiarato per il rischio precedente, in riferimento a fattori comuni di schedatura.

Incendi

In relazione al rischio di incendi boschivi, l'area è caratterizzata da una «Pericolosità Media» secondo il *Piano Regionale delle Emergenze* della Protezione Civile FVG (2008). Il clima è definito come «subcontinentale continentale debole» secondo l'indice di continentalità bioclimatica (Ic); «superumido inferiore» secondo l'indice di termicità bioclimatica (Itc); «iperumido inferiore» secondo l'indice di ombrotermicità bioclimatica (Io) (ARPA FVG, 2023). Il modello tiene conto, analogamente al precedente tipo di rischio, dei dati relativi alla precipitazione media annua (1.800-2.100 mm). Tra gli indicatori delle condizioni meteorologiche è stato richiesto di valutare anche la ventosità, pertanto, sulla base della consultazione dei valori medi provenienti da 4 stazioni di rilevamento, si è proposto un valore di vento elevato (ARPA FVG, 2023). La presenza in loco di volontari della Protezione Civile con specifiche attività antincendio contribuiscono all'attribuzione di un indice medio per l'indicatore di pericolosità regionale e locale (pari al 50%).

Per quanto riguarda la vulnerabilità architettonica, le fonti storiche riferiscono di numerosi incendi che hanno causato danni agli edifici in passato, in particolare quelli del 1671, 1798, 1873 e 1919 (Rosa, 1966[1981]; 2000, pp. 77-94). Il fattore va necessariamente contestualizzato nell'ambito delle evoluzioni del tipo architettonico (Chinellato e Croatto, 2002; Petriccion *et al.*, 2020) e delle trasformazioni del singolo caso studio. Le caratteristiche costruttive dell'edificio in esame (tra le quali la chiusura verticale a ovest con Daltz ligneo), l'assenza di dispositivi di protezione e la scarsa resistenza al fuoco degli arredi consentono di proporre una vulnerabilità formale elevata (pari all'80%) con ricadute sia sulla perdita di vite umane che di elementi caratterizzanti il patrimonio culturale di Andreis (Fig. 06b e c). Il valore di esposizione è in questo caso ricavato direttamente dal modello di calcolo e risulta medio-alto pari al 70% (Fig. 05).

Isole di calore urbano

Il contesto ambientale e climatico del centro abitato di Andreis, che si sviluppa in un bacino longitudinale (455 m slm, latitudine 46.20185), implica infine una medio-bassa pericolosità alle isole di calore urbano (pari al 40%). Ciò è rafforzato anche dalla presenza di aree verdi urbane e di specchi d'acqua in prossimità (ruscelli Susaibes, Molassa e Alba).

Le pavimentazioni sono in prevalenza realizzate con materiali tradizionali e definiscono una bassa riflettanza (albedo urbano), un'elevata permeabilità e un'alta conduttività termica. Nonostante l'edificio in esame sia esposto a ovest (contrariamente alla maggior parte delle case andreane solitamente rivolte a sud per un migliore soleggiamento), le caratteristiche specifiche del Daltz, dotato di rastrelliere in listelli di legno, favoriscono la schermatura dei raggi solari, maggiormente incidenti a ovest. I materiali da costruzione garantiscono un'alta efficienza dell'involucro (elevata massa termica dell'edificio, ridotta superficie delle finestre, presenza di sistemi di ombreggiamento e spessore delle pareti) e un'altissima resilienza termica delle pareti (elevata densità e capacità termica del materiale di muratura in pietra) e del tetto non abitato e ventilato (Fig. 06b e c). Non vi è quindi necessità di sistemi di raffrescamento. La vulnerabilità strutturale si attesta pertanto su un valore basso (20%) mentre quella formale è risultata essere medio-bassa (pari al 40% in Fig. 05). Il medesimo risultato è stato calcolato per l'indicatore di esposizione.

Riferimenti bibliografici

- Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente Friuli-Venezia Giulia – ARPA FVG (2023) *Il clima del Friuli-Venezia Giulia*. OSMER e GRN. Disponibile su: <https://www.arpa.fvg.it/> (Ultimo accesso: 31 agosto 2025).
- Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali (2020) *Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino idrografico del fiume Livenza. Prima Variante*. D.Lgs. 152/2006. Carta della pericolosità geologica. Comune di Andreis (PN). Disponibile su: <https://distrettoalpiorientali.it/> (Ultimo accesso: 31 agosto 2025).
- Biasi, A., Riavis, V., Zamboni, I., et al. (2024) 'Patrimonio architettonico urbano e cambiamento climatico. Un'occasione per affrontarne la complessità', in *Agathón | International Journal of Architecture, Art and Design*, 28/2, pp. 7-18.
- Bincoletto, L., Riccio, A. (2019) *Microzonazione sismica-Relazione illustrativa* Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Comune di Andreis.
- Chinellato, F., Croatto, G. (2002) *Percorsi di architettura spontanea dalla Valcellina alla Val Colvera*. Udine: Forum.
- Della Torre, S. (2003) 'La conservazione programmata – Una strategia per il patrimonio storico-architettonico', in *La conservazione programmata del patrimonio storico architettonico – Linee guida per il piano di manutenzione e consuntivo scientifico*. Milano: Guerini e Associati, pp. 15-20.
- Gentili, R., Croatto, G. (2008) *Il patrimonio salvato. Il recupero dell'architettura spontanea friulana dopo gli eventi sismici del 1976*. Udine: Forum.
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA (2025), *IdroGEO. La piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico*. Disponibile su: <https://idrogeo.isprambiente.it/app/> (Ultimo accesso: 31 agosto 2025).
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA, Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente – SNPA (2021), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio*. Disponibile su: <https://www.isprambiente.gov.it/it> (Ultimo accesso: 31 agosto 2025).
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - INGV (2006) *Mappa di Rischio Sismico*. Disponibile su: <http://zonesismiche.mi.ingv.it/> (Ultimo accesso: 20 agosto 2025).
- Moioli, R. (2023) *La Conservazione preventiva e programmata: una strategia per il futuro. Premesse, esiti e prospettive degli interventi di Fondazione Cariplo sul territorio*. Firenze: Nardini.
- Orecchia, F. (2024) *I daltz di Andreis. Rilievo avanzato, modellazione e analisi tecnologica*. Tesi di laurea magistrale in Architettura, Università degli Studi di Udine, a.a. 2023-2024, relatore Veronica Riavis, correlatori Alessandra Biasi, Catia Pozielli.
- Peruggia, A. (2024) *L'architettura spontanea di Andreis. Analisi tipologica e insediativa, rilievo avanzato e modellazione*. Tesi di laurea magistrale in Architettura, Università degli Studi di Udine, a.a. 2023-2024, relatore Veronica Riavis, correlatori Alessandra Biasi, Catia Pozielli.
- Petriccione, L., Chinellato, F., Croatto, et al. (2020) 'Architettura, tradizione e recupero in un centro storico minore del Friuli Venezia Giulia', in *Rivista valori e valutazioni*, 25, pp. 19-26. Disponibile su: <https://hdl.handle.net/11390/1187800> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).
- Protezione Civile Friuli-Venezia Giulia (2008), *Piano di Emergenza Regionale*, delibera di Giunta Regionale n. 99, DD. 18.1.2008. Disponibile su: <https://pianiemergenza.protezionecivile.fvg.it/risks/incendi> (Ultimo accesso: 31 agosto 2025).
- Provincia di Pordenone, Comune di Andreis (2013). *Piano Regolatore Generale Comunale, Variante n. 5*. Disponibile su: <https://www.comune.andreis.pn.it/it> (Ultimo accesso: 31 agosto 2025).
- Rosa, G. [1966[1981]] *La Villa e la Valle di Andreis*. Pordenone: F.lli Cosarini.
- Rosa, G. (2000) *"Girar negoziando fuori paese". Merceri, prestasoldi e borsari: Andreis nel Settecento tra comunità vicine e mercati lontani*. Manzano: Grafiche Manzanese.
- Rovida, A., Locati, M., Camassi, R., et al. (2022). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). Disponibile su: <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.3>.
- Scortegagna, U., Zanetti, M. (2008) *Escursioni nel Parco Naturale Dolomiti Friulane*. Verona: Cierre.
- Valussi, G. (1967) *La Valcellina. Guida storico-geografica per il turista*. Pordenone: Del Bianco.

Note

- 1 Il nucleo abitato di Andreis (455 m. slm) è capoluogo dell'omonimo Comune, sito in Provincia di Pordenone, membro della Comunità Montana Meduna Cellina, nonché parte integrante del Parco delle Dolomiti Friulane.
- 2 Del gruppo di ricerca fanno parte Alessandra Biasi, Giada Frappa, Margherita Pauletta, Isabella Zamboni.
- 3 Il modello multirischio è uno degli elementi centrali della metodologia complessiva sviluppata nell'attività 2.3 - *Heritage, recovery, conservation*, riguardante l'analisi del rischio e l'individuazione delle azioni di mitigazione per edifici e siti urbani. Per approfondimenti cfr. E. Rinaldi, *Verso un modello di analisi del rischio e azioni di mitigazione per i macro-eventi* nel presente volume.
- 4 Sulla caratterizzazione, ai presenti fini, dei Daltz si veda in particolare il saggio di Pauletta e Frappa.
- 5 Si rimanda in merito a quanto trattato da Pauletta, Frappa e Zamboni in questo articolo.
- 6 Studi circostanziati sulle strategie di protezione trovano rimandi alla scala territoriale nelle previsioni del PRGC 2013.
- 7 Relativamente agli esiti si rimanda ai contributi di Pauletta, Frappa, Zamboni in questo saggio.
- 8 In merito si rimanda a Pauletta in questo saggio. Si sottolinea che tutti gli indicatori interfacciano la valutazione degli altri fenomeni di rischio, vedi Zamboni in questo articolo.

Attribuzioni

Il paragrafo dal titolo *Una metodologia per l'analisi dei rischi in vista di misure di protezione dei Daltz* è da attribuire ad Alessandra Biasi, i paragrafi dal titolo *Analisi del rischio per il caso studio considerato, Terremoto e Alluvione* sono da attribuire a Margherita Pauletta e Giada Frappa, mentre i paragrafi *Incendi e Isole di calore urbano* sono da attribuire a Isabella Zamboni.



FIGURA 01

Inquadramento geografico di Andreis e frazioni.
A. Perugia, 2024.

● DALTZ A IMPIANTO MONOCELLULARE (P3)



● DALTZ IMPIANTO BICELLULARE (S1)



● DALTZ IMPIANTO TRICELLULARE (T)

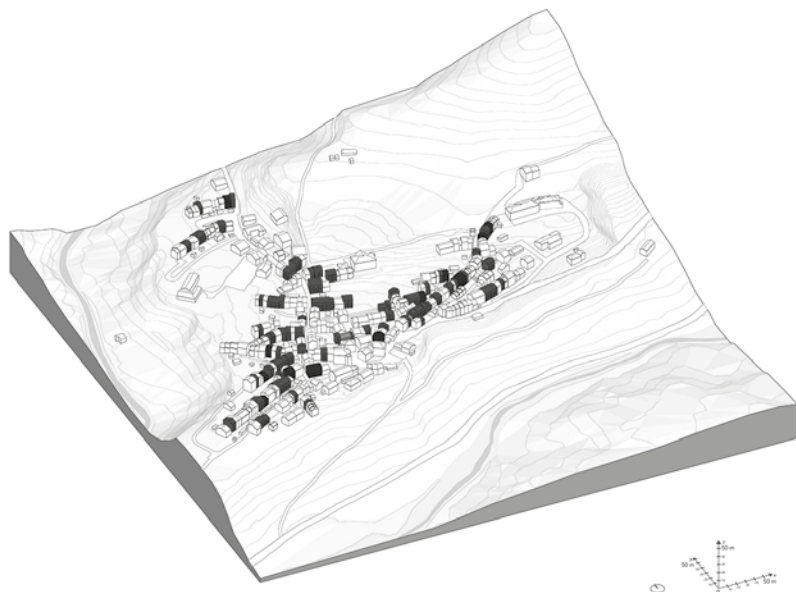


FIGURA 02

Principali tipi di Daltz riscontrati ad Andreis.
A. Perugia 2024.

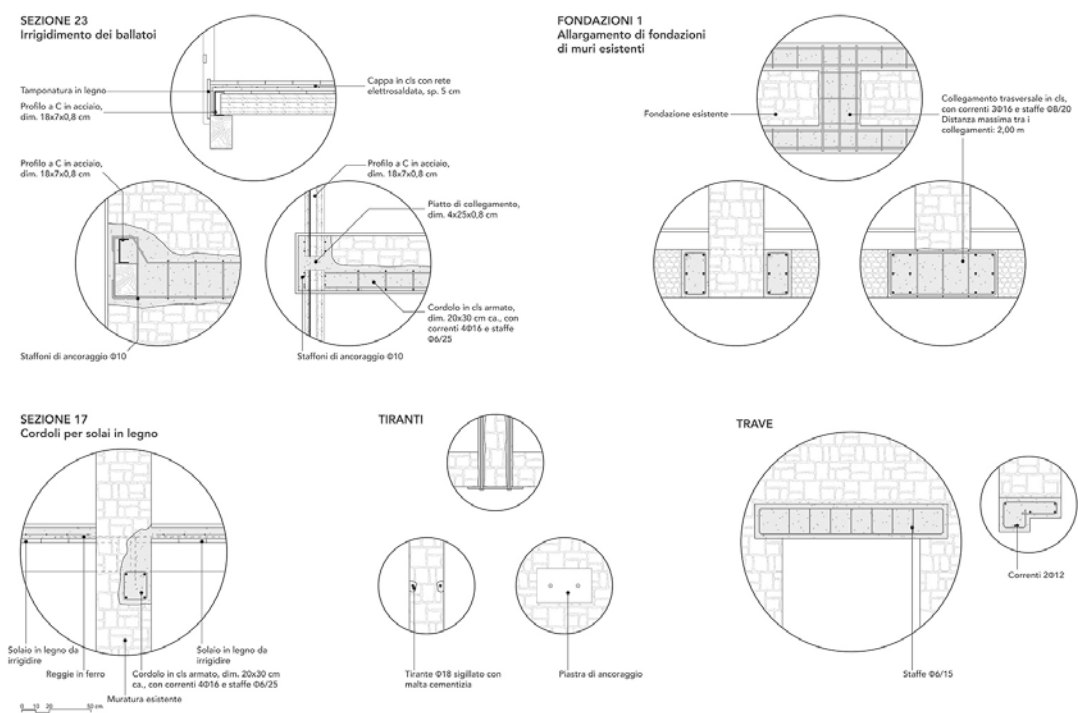


FIGURA 03

Alcuni dettagli costruttivi degli interventi post sisma 1976 eseguiti sui Daltz di Andreis. F. Orecchia, 2024.

	MAS 1	MAS 2	MAS 3	MAS 4	RC 1
numero	209	193	56	7	1
%	44,8	41,4	12,0	1,5	0,2

TABELLA 01

Distribuzione percentuale delle tipologie strutturali rilevate. M. Pauletta, 2024.



MAS₁



MAS₃



RC₁



MAS₂



MAS₄

FIGURA 04

Tipologie degli edifici rilevati in Andreis.
M. Pauletta, 2024.

Hazard parameters weighted values

	Earthquake - E	Flood - H	Fire - F	UHI - U	Multi-hazard - HM_{multi}
Regional hazard - Rig	0,9333	0,6000	0,5333	0,4400	2,5067
Local hazard - Ril	0,8000	0,7333	0,5000	0,4000	2,4333
Total sum hazard - TH_{event}	1,7333	1,3333	1,0333	0,8400	
Total average hazard - TH_{event}	0,8667	0,6667	0,5167	0,4200	

Vulnerability and exposure parameters weighted values

	Earthquake - E	Flood - H	Fire - F	UHI - U	Multi-hazard - HV_{multi}
Formal Vulnerability - Vu_{for}	0,8000	0,4000	0,8000	0,4250	2,4250
Exposure - E	0,4000	0,4000	0,6667	0,4000	1,8667
Structural Vulnerability - Vu_{str}	0,6364	0,4000	0,6000	0,2000	1,8364
Total sum Vulnerability - TV_{event}	1,8364	1,2000	2,0667	1,0250	
Total average Vulnerability - TV_{event}	0,6121	0,4000	0,6889	0,3417	

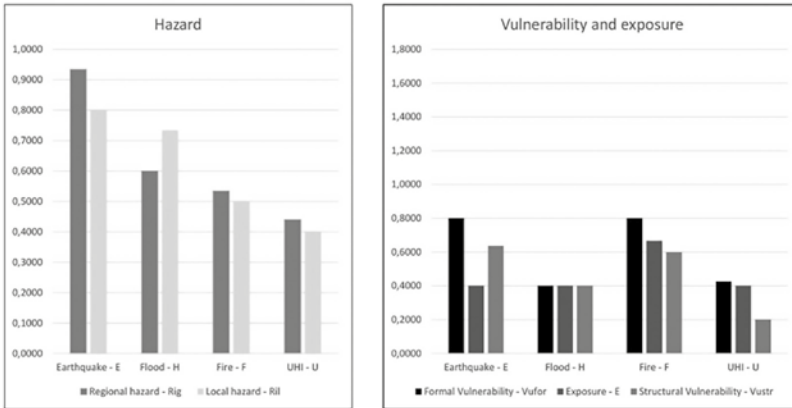
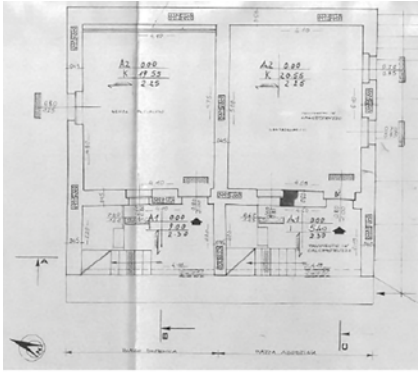


FIGURA 05

Indicatori di parametri e componenti del modello di rischio riferiti al caso studio.

A. Biasi, M. Pauletta, I. Zamboni, G. Frappa, 2025.



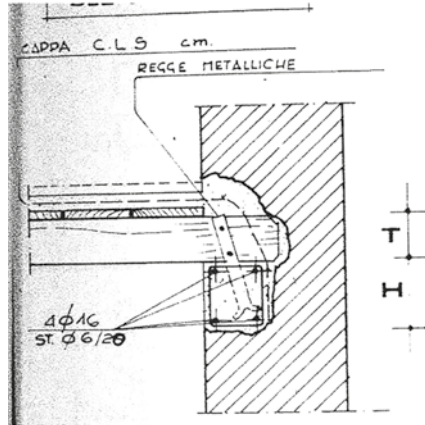
(a)



(c)



(b)



(d)

FIGURA 06

Caratteristiche formali e strutturali del caso studio: (a) pianta piano terra; (b) facciata ovest; (c) facciata sud; (d) dettaglio dell'intervento di rinforzo del solaio. Archivio Comune di Andreis (PN), 1981. I. Zamboni, 2024.

Autori	Claudia Pirina Giovanni Comi Vincenzo d'Abramo
Affiliazione	Università degli Studi di Udine



Il viale alberato in ingresso alla ex-caserma Piave, Udine.
C. Pirina, G. Comi, V. d'Abramo, 2024.

Strategie di riuso del patrimonio militare dismesso tra sostenibilità e consumo di risorse

IL PATRIMONIO MILITARE DISMESSO E IL CONTESTO DELLA CITTÀ DI UDINE

Il patrimonio militare dismesso nel contesto della città di Udine, attraverso una pluralità di casi studio, testimonia un legame profondo tra questi manufatti, il contesto geografico e la memoria dei luoghi in cui sono inseriti, sia per ragioni prettamente storiche, che morfologico-urbane. Considerate «le valenze “storiche” e “identitarie” loro attribuite, talvolta per il valore architettonico degli edifici, più spesso per le memorie locali e il loro appartenere alle biografie di molte persone» (Marchigiani e Cigalotto, 2022) le aree militari costituiscono un tema di grande importanza, per la rilevanza e consistenza che questo patrimonio diffuso ha avuto nella trasformazione degli ultimi ottant'anni di «una città [Udine] a forte vocazione agricola e artigiana in un importante “presidio militare di confine”» (Conti *et al.*, 2017) e della regione, quindi di ciò che potrebbe significare un loro recupero per il futuro. Costituiscono insomma parte di quell'«ossatura» ambientale artificiale» (Tentori, 1982) ancor oggi visibile nel territorio.

La dismissione e la conseguente riconversione di questo tessuto costruito rappresentano, dunque, sia un problema architettonico – offrendo spunti di riflessione sulle soluzioni progettuali ipotizzabili ed esplorabili alla scala dell'edificio in sé – sia un problema urbano, perché consentono di interrogarsi sul rapporto tra questi manufatti abbandonati e la città. Si pensi alla militarizzazione che ha interessato il confine orientale e alle reazioni che tale fenomeno ha generato nel secondo dopoguerra in termini di resistenze e problematiche e all'opportunità che oggi la riconversione di queste aree può rappresentare non solo per questi ambiti ma per le aree che vi gravitano intorno (Michelutti, 2012; Baccichet, 2015).

L'adattamento e la rigenerazione del patrimonio edilizio esistente rappresenta un tema di riflessione e sperimentazione anche per i significativi impatti energetici che può avere sulla città e, in questo senso, le aree dismesse offrono un'opportunità di ricerca, grazie al loro potenziale, sia rispetto ai temi degli spazi residuali e abbandonati in contesti urbani, sia alla risignificazione e ridefinizione dei sistemi paesaggistico-territoriali a cui questi comparti sono intrinsecamente legati. Sembra utile considerare questo processo non solo come mantenimento e valorizzazione del patrimonio architettonico in sé, ma anche nel quadro di possibili interventi di “restauro ecologico” (Santarossa *et al.*, 2016), capaci di innescare una reale rigenerazione di questi siti alle diverse scale.

Il progetto architettonico, affrontato rispetto allo specifico tema dei sistemi militari dismessi, può quindi trasformarsi in uno strumento “attivo” rispetto alle questioni legate alla transizione energetica, proponendo

soluzioni specifiche orientate a una maggiore sostenibilità ambientale, e ponendo attenzione «a questioni urbane di diverso genere, tra cui: la riduzione del consumo di suolo; l'aumento della dotazione di spazi pubblici aperti [...] e, in generale le dotazioni urbane e servizi per la comunità» (Gastaldi e Camerin, 2019).

Considerare questi manufatti come patrimonio non significa rivalutarli solo da un punto di vista storico-artistico, bensì leggerli anche rispetto alla loro capacità di raccontarci un pezzo di città, del suo territorio e delle sue trasformazioni, di quell'antico e incessante rapporto che l'architettura intesse nel definire e costruire paesaggi, reali o immaginari, che poi sono le tracce di futuri possibili.

FIGURA 01 – P. 120

CASERME ATTIVE, DISMESSE, RICONVERTITE, IN TRASFORMAZIONE. UN QUADRO GENERALE NELLA CITTÀ DI UDINE

Questo vasto patrimonio militare, sempre più soggetto a processi di degrado e abbandono, risulta dunque particolarmente interessante per due ragioni: la sua collocazione e la natura dei manufatti, edifici spesso concepiti secondo la medesima grammatica costruttiva e tipologica, che permettono quindi di traslare il ragionamento architettonico-progettuale da una condizione particolare a una generale, con un certo grado di libertà quantomeno teorica.

La questione dello smantellamento e della riconversione delle aree militari dismesse e abbandonate ha mostrato come la necessità di ripensare questi manufatti non più come opere autonome, ma come risorse attive per una riconfigurazione urbano-territoriale in un'ottica di sviluppo a scala vasta (Cappelletti *et al.*, 2008) non possa più essere rinviata, configurandosi come un'opportunità rigenerativa per un paesaggio rinnovato, capace di intercettare, all'interno dei progetti di riconversione, anche le reti naturali (verdi e blu) e infrastrutturali con cui questi siti si confrontano. In questo dibattito appare necessario intendere il termine "riconversione" non tanto nel senso della semplice sostituzione di funzioni diverse da quelle connesse all'insediamento militare, quanto piuttosto in termini di ricomposizione delle relazioni urbane, dei rapporti tra costruito e spazi aperti della città e del territorio circostante, in un'ottica di un possibile ridisegno complessivo. In questo senso, la città di Udine mostra un panorama di soluzioni e casi studio eterogenei, contesti con diversi gradi di difficoltà, di interesse, di complessità storiche e urbane.

L'EX CASERMA PIAVE A UDINE. LO STATO DI CONSERVAZIONE

A titolo esemplificativo la ricerca si è occupata del caso dell'ex caserma Piave, un sito dismesso situato lungo il perimetro meridionale del lotto occupato dall'ex acciaieria Safau (anch'essa oggi dismessa). Attualmente enclave territoriale in un'area cerniera tra la città e i territori di espansione agricola a sud di Udine, il complesso si trova in un lotto delimitato a ovest dalla linea ferroviaria Udine-Cervignano e dall'asse territoriale di via Lumignacco e a est dalla Roggia Milleacque – porzione del più ampio e storico canale Ledra-Tagliamento. Longitudinalmente, il canale Ledra di Castions attraversa il sito per tutta la sua lunghezza, segnandone il margine settentrionale, dividendo figurativamente l'ex caserma dal comparto dell'ex acciaieria.

FIGURA 02 – P. 122

Il complesso, costruito in luogo dell'autoparco militare edificato nella prima metà degli anni '30 sulla stessa area, sorge su un'area preesistente, con alcuni manufatti rurali o periurbani, come dimostra una planimetria datata 1939 che testimonia lo stato dei luoghi durante la costruzione dell'ex acciaieria. La caserma si è dunque definita progressivamente nel tempo, attraverso la costruzione di manufatti diversi, destinati a differenti usi, disposti secondo un preciso modello funzionale in grado di garantire la presenza di ampie aree destinate a spazi di adunata e di circolazione.

Planimetricamente, i padiglioni dell'ex caserma sono disposti secondo uno schema longitudinale, più o meno parallelo al canale Ledra di Castions. Gli edifici seguono precise regole dimensionali e distributive e sono caratterizzati da una forte serialità e scomponibilità, tali da favorire non solo la massima economia e la maggiore rapidità possibile nella costruzione, ma anche una razionalità funzionale che ne avrebbe agevolato la potenziale espansione-trasformazione nel tempo. Ad esclusione di alcuni edifici, come per esempio la villa posta in ingresso verso via Lumignacco e l'edificio che era destinato all'alloggio ufficiali, si tratta di complessi ordinari, slegati completamente, per ovvie ragioni anche funzionali, dal tessuto urbano circostante. Un complesso, se si aggiunge l'ex acciaieria e l'ex fabbrica Gervasoni-Scaini, che segna una cesura urbana significativa del comparto meridionale della città. Gli edifici situati all'ingresso verso via Lumignacco, databili ai primi del Novecento, ospitavano gli spazi di guardiana e si configurano come il nucleo più antico dell'area.

FIGURA 03 – P. 123

STRATEGIE DI INTERVENTO

La ricerca sulle ex caserma Piave si è posta l'obiettivo di indagare possibili strategie alternative alla sola demolizione dei manufatti, ripensando questi manufatti attraverso interventi selettivi e mirati sul corpo degli edifici, operazioni che misurano l'efficacia delle pratiche di recupero di componenti e materiali in vista di un loro possibile riuso futuro. Le strategie di intervento sono intese, da un lato, come componenti specifiche legate alla lettura e all'analisi di oggetti puntuali, ma si pongono anche il compito di individuare possibili categorie applicabili ad altri contesti e situazioni simili, ponendosi criticamente non solo sul "come" intervenire, ma anche sul "perché".

L'ex area militare, ad oggi oggetto di interventi di demolizione e bonifica da parte dell'amministrazione comunale per trasformarla in un parco urbano, si configura ancora come un corpo separato rispetto al tessuto urbano circostante. Le trasformazioni previste per l'area, slegate dal contesto, seguono la logica di una riqualificazione puntuale, legata al sito e non a comparto più ampio nel quale si inseriscono. Rimane invece, a nostro avviso, fondamentale la relazione che esiste tra l'ex caserma e gli altri edifici produttivi dismessi, e tra l'ex caserma e il sistema infrastrutturale, che incide profondamente su questa parte di città.

Ponendosi anche in continuità con la proposta comunale di trasformare il lotto in un parco, la proposta indaga la possibilità di salvaguardare il patrimonio costruito e, con esso, la memoria del luogo.

FIGURA 04 – P. 123

In questo quadro intervenire attraverso una serie di mirati innesti architettonici, rende possibile non solo una nuova fruibilità, ma, in alcuni

casi, anche una vera e propria reinvenzione degli edifici esistenti a patto di «acuire la vista e scorgere quello che, pur esistendo, non è visibile» (Storrelli e Turri, 2014). La ricerca ha quindi selezionato tre architetture emblematiche, scelte sulla base del loro stato di conservazione, del grado di vulnerabilità, della tipologia e dei diversi sistemi costruttivi su cui proporre interventi finalizzati alla valorizzazione del patrimonio in senso tipologico e spaziale, in forma di *exempla* per possibili strategie operative replicabili.

FIGURA 05 – P. 124

Il padiglione che ospitava la mensa e spazi per uffici al primo piano è composto in sezione da un corpo principale che si sviluppa su due livelli e da due navate laterali di altezza inferiore. L'edificio, costruito con struttura mista in cemento armato e mattoni, risulta ad oggi in buono stato di conservazione che consente di prevedere operazioni di manutenzione e consolidamento delle strutture per la sua rifunzionalizzazione.

L'edificio destinato a officina è costituito invece da due corpi affiancati, coperti da due sistemi di capriate di diversa natura: la parte più a sud conserva ancora una capriata mista in legno e acciaio – tipo *Polonceau* – in buono stato di conservazione – anche se in parte crollata –, mentre la parte più a nord presenta una capriata metallica, frutto di un intervento di ampliamento successivo. L'ipotesi progettuale prevede la ricostruzione della capriata e della copertura laddove necessario, mantenendo le strutture portanti ancora in buone condizioni e integrando e restituendo all'edificio il suo, presumibilmente, originario sistema costruttivo.

L'edificio in muratura destinato ad alloggi per ufficiali è composto da una lunga serie di stanze. Di forma stretta e allungata, presenta un forte stato di degrado, con le pareti esterne ancora in piedi ma la copertura quasi completamente crollata. Il volume è suddiviso in una sequenza di ambienti interni che si aprono direttamente verso lo spazio antistante, senza alcun sistema distributivo interno. La proposta prevede di intervenire sulla volumetria interna attraverso l'inserimento di volumi in legno totalmente autonomi dal punto di vista strutturale, che ridefiniscono la spazialità interna dell'edificio. I volumi tuttavia riconoscono l'impianto tipologico, lavorando sul consolidamento delle strutture e innestandosi tra le murature esistenti, attraverso un sistema di stanze.

TECNOLOGIE E METODOLOGIE PER L'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

Da un punto di vista tecnologico, seppur con tre approcci e metodologie differenti, i tre interventi mirano a migliorare l'efficienza e le prestazioni energetiche degli edifici affinché risultino compatibili con gli standard e un possibile uso contemporaneo, proponendo al contempo tecnologie/metodologie legate alla sostenibilità, alla facilità di intervento, alla manutenzione nel tempo e alla reversibilità delle operazioni.

Il primo caso analizzato – l'edificio della mensa – presenta un buono stato di conservazione, pertanto l'intervento prevede un mantenimento e consolidamento delle strutture per una loro rifunzionalizzazione e una serie di interventi mirati su alcuni elementi del fabbricato attraverso una strategia di decostruzione e demolizione selettiva che favorisca la conservazione e il riciclo di ciò che esiste per poter essere riutilizzato. Le prestazioni energetiche dell'edificio vengono incrementate tramite l'applicazione di materiali isolanti e di rivestimento interni, così da mantenere inalterato l'aspetto esterno, che, pur non avendo un elevato valore artistico, riflette la storia e l'identità di questa parte della città. Infine, il buono stato di conservazione dello scheletro in cemento armato

consente di lasciarne intatta la struttura, concentrandosi unicamente sugli aspetti legati all'involucro interno ed esterno.

Il caso dell'edificio destinato a officina differisce dal precedente soltanto per quanto riguarda la ricostruzione delle parti di copertura in grave stato di degrado o parzialmente crollate. Per l'involucro edilizio, infatti, è possibile riproporre ragionamenti e tecnologie analoghe a quelle del caso precedente, mentre per la ricostruzione della copertura si è scelto di reinterpretare la tecnologia esistente, cercando di migliorarne le prestazioni energetiche, soprattutto attraverso l'integrazione di materiali isolanti. La copertura dell'officina è costituita da una capriata lignea con catena in acciaio, rivestita esternamente con elementi in lamiera metallica. Per la parte strutturale, laddove assente, la capriata di tipo legno-acciaio è stata mantenuta o ricostruita, intervenendo invece sul rivestimento della copertura, con l'inserimento di un nuovo pacchetto di isolamento termico e l'utilizzo di una leggera lamiera zincata.

Nel terzo caso studio, gli ex alloggi ufficiali, le operazioni di manutenzione o l'inserimento di nuovi rivestimenti interni (muratura) o esterni (copertura) non risultano sufficienti, poiché l'edificio è fortemente compromesso a causa dell'abbandono e del degrado. L'inserimento di nuove strutture, con un sistema *box-in-the-box*, non funge soltanto da seconda pelle, ma da vero e proprio elemento autonomo. Questo secondo sistema è interamente realizzato in legno: una struttura portante a telaio rivestita con pannelli e listelli lignei, all'interno della cui intercapedine trovano posto impianti e sistemi di isolamento termico. Tale sistema consentirebbe di riutilizzare la struttura, pur mantenendo in parte l'aspetto e il volume originari, ma riconfigurandola dal punto di vista ambientale.

Infine, in generale per l'intera area, si propone la rimozione delle pavimentazioni esterne, oggi quasi interamente coperte da asfalto. Al fine di migliorare la qualità ambientale del sito e restituirlo alla città, si propone la trasformazione dell'area esterna in un grande parco – come già previsto dal piano struttura del Comune di Udine – sostituendo il manto di asfalto con pavimentazione permeabile, introducendo l'uso della pietra piacentina, impiegata in gran parte del centro storico di Udine, alternata a fasce verdi.

Con questo scenario di prefigurazione progettuale, l'intervento permetterebbe da un lato di riutilizzare e mantenere le strutture, come legame storico con la città e con i cittadini che ne hanno vissuto le trasformazioni, adattandole a esigenze e a requisiti che si configurino come veri attrattori civili in sostituzione delle polarità militari perdute (Storelli, Turri, 2014), e, dall'altro, di rendere accessibile un'area che oggi rappresenta una cesura, attribuendole un nuovo valore e restituendole qualità urbana.

Riferimenti bibliografici

- Baccichet, M. (a cura di) (2015) *Fortezza FVG. Dalla Guerra Fredda alle aree militari dismesse*. Monfalcone: Edicom.
- Cappelletti, V., Turri, F., Zamperini, E. (2008) 'Il recupero delle caserme: tutela del patrimonio e risorsa per la collettività', in *Territorio*, 46, pp. 72-84. Disponibile su: <https://www.francoangeli.it/riviste/articolo/34713> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).
- Conti, C., La Varra F., Petriccione, L., et al. (2017) 'Esperienze inclusive di rigenerazione urbana: caserme dismesse nella periferia di Udine', in *Technè*, 14, pp. 188-199. Disponibile su: <https://doi.org/10.13128/Technè-20794>.
- Gastaldi, F., Camerin, F. (2021) *Rigenerare le aree militari dismesse. Prospettive, dibattiti e riconversioni in Italia, Spagna e in contesti internazionali*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli. Disponibile su: <https://doi.org/10.30448/UNI.916.50825>.
- Gastaldi, F., Camerin, F. (2019) *Aree militari dismesse e rigenerazione urbana. Potenzialità di valorizzazione del territorio, innovazioni legislative e di processo*. Siracusa: Letteraventidue.
- Marchigiani, E., Cigalotto, P., (2022) *Il riuso delle caserme in piccole e medie città. Questioni di progetto a partire dal Friuli Venezia Giulia*. Trieste: EUT.
- Michelutti, P. (2012) 'Servitù militari e militarizzazione. Il Friuli Venezia Giulia 1949-1989', in *Italia contemporanea*, 267, pp. 291-307. Disponibile su: <https://doi.org/10.3280/IC2012-267005>.
- Santarossa, A., Sciré Risichella, G. (2016) *Un paese di primule e caserme*. Pordenone: Cinemazero.
- Storelli, F., Turri F. (2014) *Le caserme e le città: i beni immobili della difesa tra abbandoni, dismissioni e riusi*. Roma: Palombi.
- Tentori, F. (1982) *Udine: mille anni di sviluppo urbano*. Udine: Casamassima.



FIGURA 01

Le caserme attualmente dismesse nella città di Udine (in nero) e il rapporto con alcuni elementi morfologicamente significativi: il Cormor, il Torre e le rogge.
C. Pirina, G. Comi, V. d'Abramo, 2025.



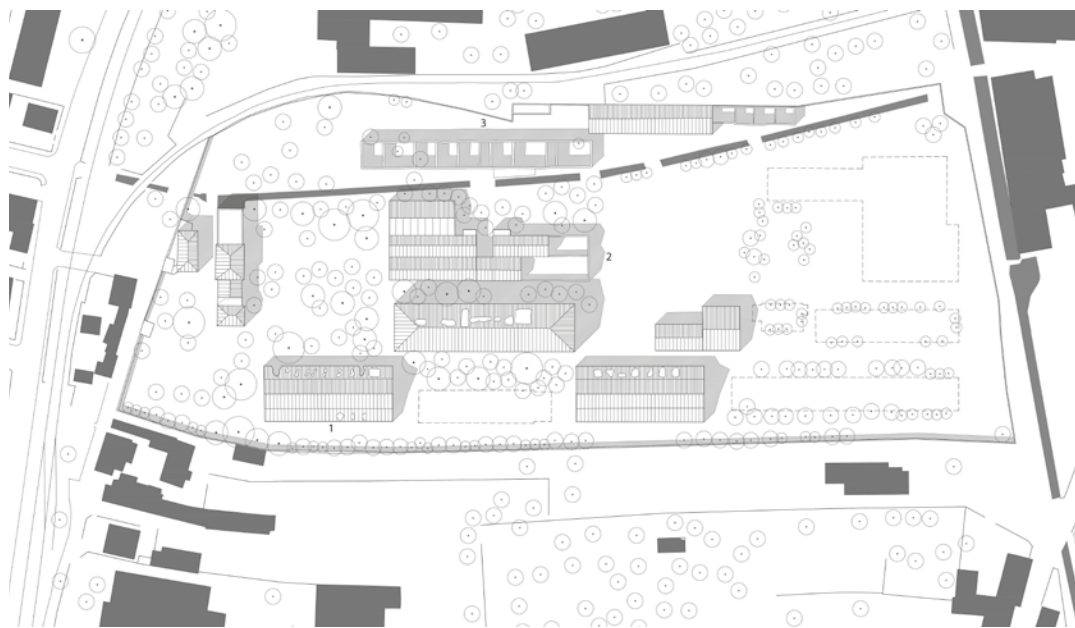


FIGURA 02

Restituzione dello stato di fatto dell'ex-Caserma Piave.

In tratteggio i volumi già demoliti in seguito all'inizio dei lavori di bonifica dell'area.

C. Pirina, G. Comi, V. d'Abramo, 2025.

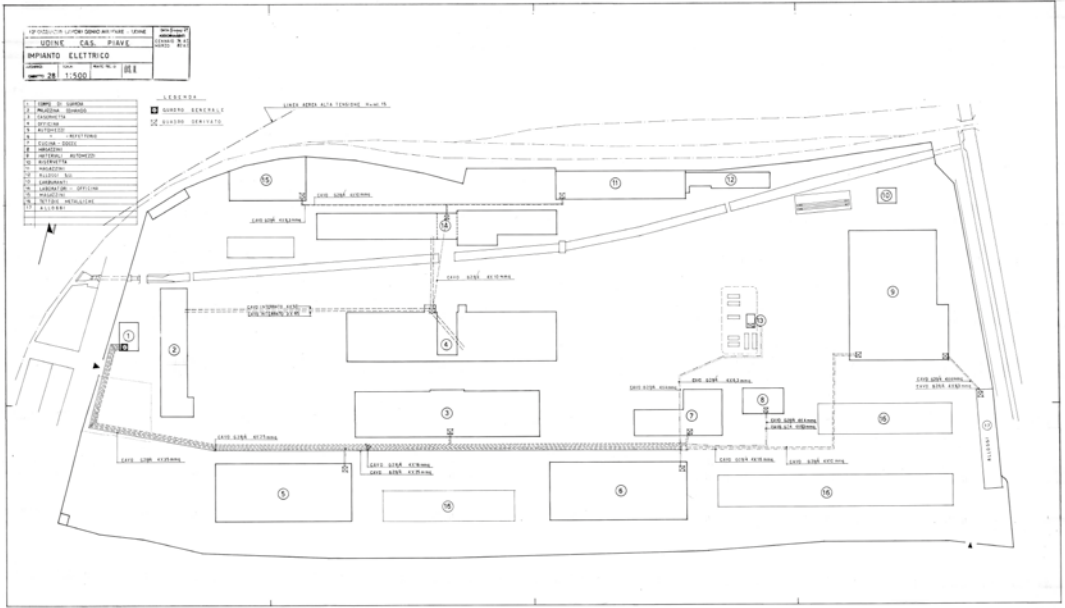


FIGURA 03

Caserma Piave, stato dei luoghi a marzo 1982, con indicazione delle destinazioni d'uso.
Archivio del Comune di Udine, 1982.

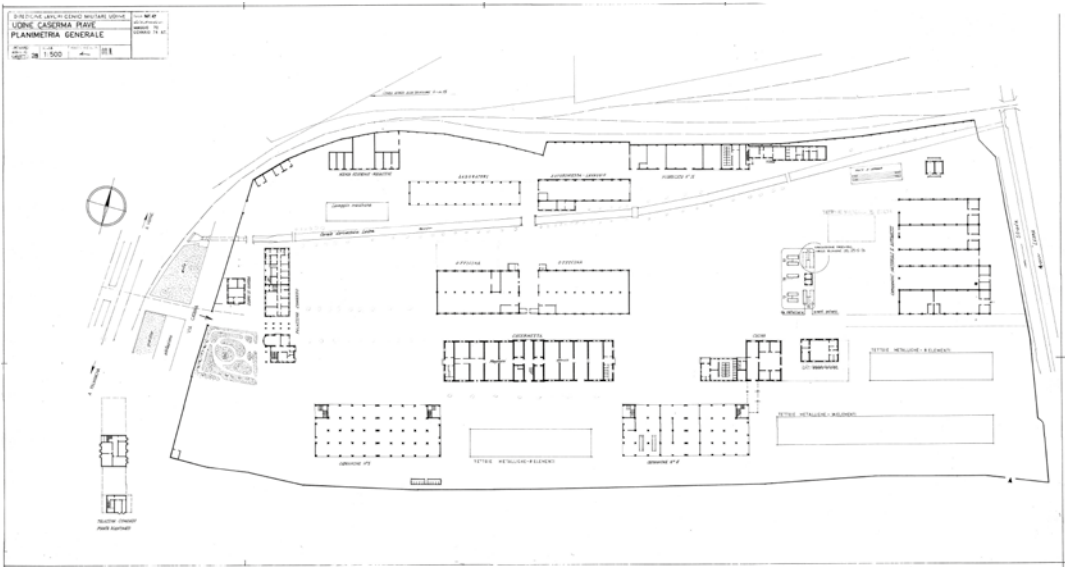


FIGURA 04

Caserma Piave, planimetria dei piani terra nel gennaio 1974.
Archivio del Comune di Udine, 1974.

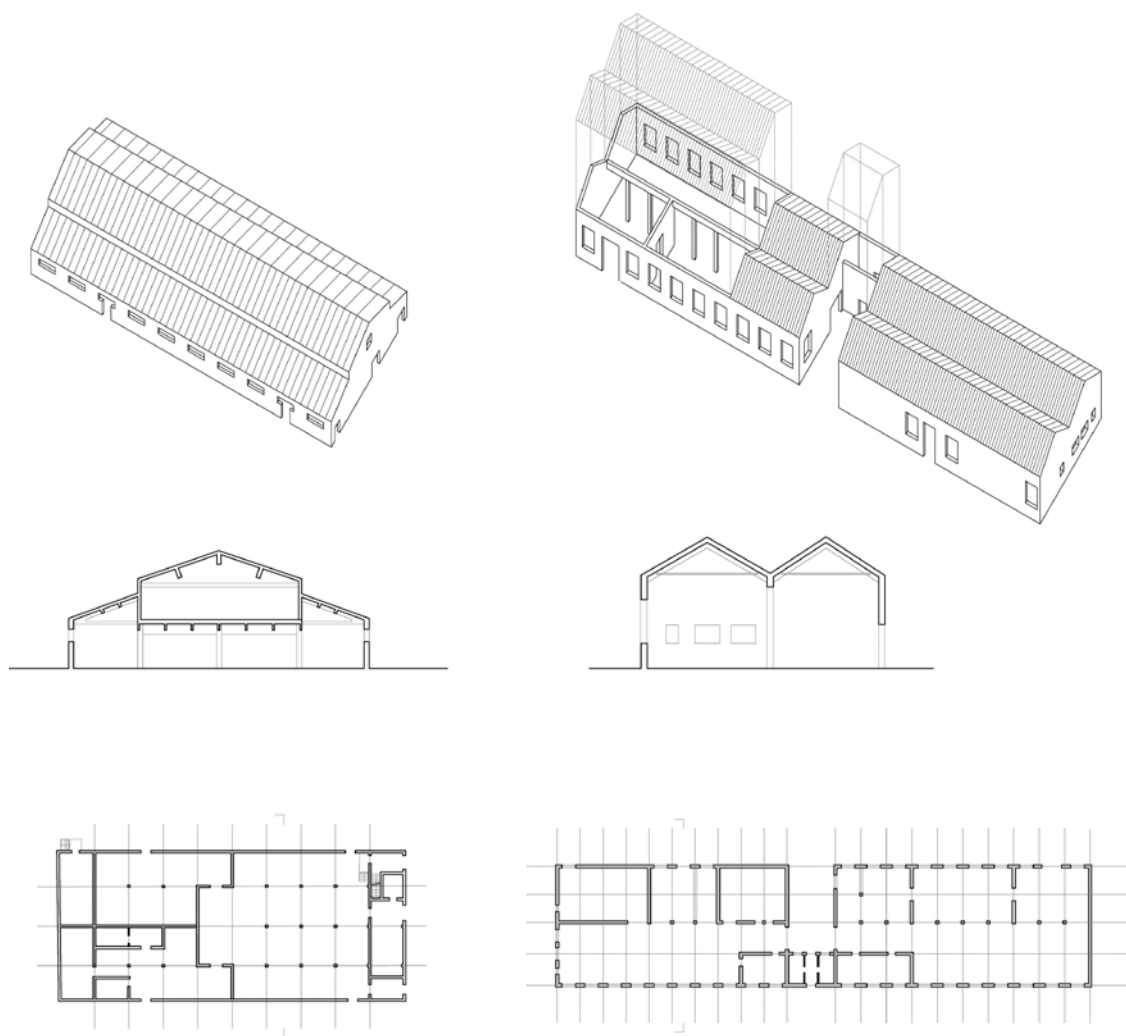
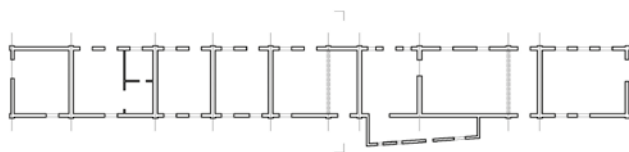
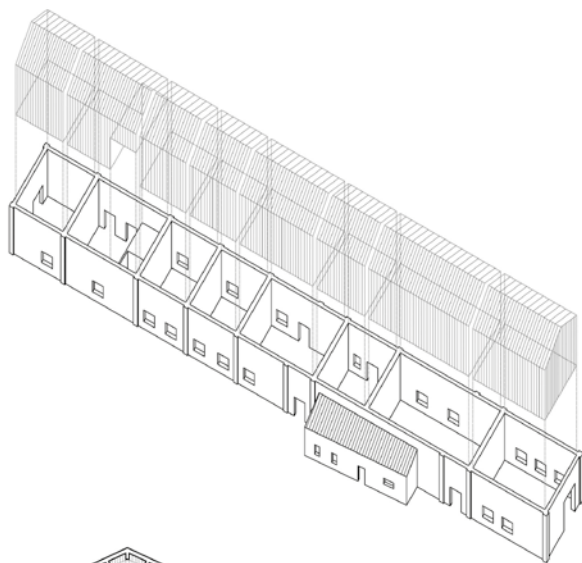


FIGURA 05

Ipotesi di intervento su alcune strutture esistenti: conservazione, integrazione e trasformazione.

C. Pirina, G. Comi, V. d'Abramo, 2025.



Autori	Thomas Bisiani Carlo Antonio Stival
Affiliazione	Università degli Studi di Trieste



Villaggio operaio di Panzano.
Vista esterna di una casa operaia a 8 alloggi, tipologia 1-A, T.
Bisiani, C.A. Stival, 2025.

Componenti di facciata per integrare/adattare le unità abitative del patrimonio moderno

La ricerca condotta integra approcci tecnologici e valutativi per incrementare la sostenibilità attraverso l'analisi di componenti architettonici innovativi. Questi componenti definiscono "spazi intermedi" come elementi di transizione per facilitare trasformazioni fisiche, spaziali e relazionali nell'ambiente costruito. Gli interventi architettonici sono volti a migliorare la flessibilità spaziale, l'integrazione tecnologica e la qualità abitativa, affrontando al contempo sfide sociali critiche tra cui rischi per la salute, disuguaglianze di genere ed emarginazione socioeconomica (Patterson, 2022), presenti dal Regolamento UE n. 241/2021. Ci si riferisce, in particolare, a tecnologie e metodologie innovative applicabili al patrimonio costruito e caratterizzate da replicabilità ed efficacia nell'incrementare sostenibilità ed efficienza su larga scala, creando ambienti di gradualità tra spazio pubblico e privato, di fruizione per attività informali (networking, gestione dei bambini nel tempo libero).

Lo studio, in particolare, applica la metodologia originale *Renovation through Design for Adaptability/Flexibility/Change*, che si concentra sul potenziale di integrazione con il patrimonio edilizio esistente, sulla replicabilità degli interventi, sull'ottimizzazione nell'uso dello spazio (Limoncin *et al.*, 2025). L'approccio metodologico affronta il patrimonio esistente con l'obiettivo di indagare l'aggiornamento funzionale e prestazionale ottenibile in un'ottica di sostenibilità e adattabilità. Data la complessità della riabilitazione del patrimonio residenziale, l'indagine delle caratteristiche dei potenziali interventi difficilmente può descriverne la complessità di metodologie e obiettivi (Paris e Bianchi, 2019). Un modello multi-attributo può aiutare a condurre valutazioni in contesti operativi dove convergono diverse esigenze, come la conformità a standard di qualità più elevati, la sostenibilità ambientale e sociale nelle azioni di riabilitazione, la conservazione dei valori culturali in associazione con il patrimonio costruito.

La metodologia *Renovation through Design for Adaptability/Flexibility/Change* muove da una procedura analitica per lo studio delle esperienze di progettazione contemporanea e, nel suo sviluppo, serve come strumento per introdurre/esplorare nuovi concetti spaziali all'interno degli oggetti architettonici esistenti in relazione al miglioramento di aspetti specifici del comfort ambientale.

La trasformazione e il rinnovamento del vasto patrimonio esistente a uso residenziale è un tema centrale nella cultura architettonica contemporanea, dove l'interazione tra spazio, tipologia e sistemi edilizi diventa un driver per la conservazione o la trasformazione, riconoscendo le capacità rigenerative e trasformatrice degli edifici, dei loro spazi e dei loro componenti (ARSP Architekten, 2018; Lacaton e Vassal, 2008; 2011). L'aggiunta di nuovi spazi modulari e apribili, strutturati come balconi, operanti ad esempio come giardini d'inverno, può apportare miglioramenti significativi nella

fornitura di aria esterna, nella modulazione della luce diurna e nell'integrazione del verde, migliorando così le condizioni abitative sia in termini di comfort che di qualità della vita degli abitanti (GutGut, 2009; Virtuel Architecture, 2009). Queste soluzioni consentono agli utenti (specialmente se vulnerabili) di trovare un nuovo interesse nel vivere i propri spazi residenziali. La ricerca esamina dunque i potenziali gradi di trasformazione degli edifici residenziali in uso attraverso il ripensamento dei sistemi di facciata e di nuove integrazioni spaziali e volumetriche.

SVILUPPO DEL MODELLO VALUTATIVO

La definizione degli aspetti che consentono la valutazione della congruenza degli interventi nella riabilitazione del patrimonio edilizio è configurabile come un problema multicriterio (Giove *et al.*, 2011). L'intersezione di aspetti qualificanti, come sostenibilità, compatibilità di applicazione, miglioramento funzionale degli edifici esistenti, apre ad una lettura più efficace dello stato dell'arte e contemporaneamente ridimensiona quelle soluzioni che massimizzano una singola caratteristica a scapito delle altre, in una valutazione qualitativa, organizzata in un *framework* su molteplici parametri concorrenti.

Gli indicatori possono essere derivati da punti di vista relativi, derivanti da specifiche sensibilità architettoniche, tecniche e storiche; inoltre, i criteri capaci di descrivere gli interventi di riabilitazione sono soggetti a cambiamenti temporali, a causa di variazioni nelle condizioni culturali ed economiche della società e del contesto. Qui, i criteri e gli attributi proposti possono essere utili per limitare la soggettività dell'interpretazione critica dell'edificio e della sua riabilitazione. Nell'ambito della ricerca, le azioni di riabilitazione sul patrimonio edilizio affrontano due ambiti sostanziali:

- l'intervento sulle unità tecnologiche dell'edificio che prevedono una nuova forma del suo involucro;
- l'intervento sulle unità spaziali delle abitazioni che definiscono nuovi ambienti disponibili per gli utenti, coinvolgendo la disposizione distributiva e le partizioni interne.

Concentrandosi sull'implementazione di sistemi di facciata innovativi capaci di generare esternalità positive e migliorare il benessere degli utenti, il *framework* di valutazione proposto adotta attributi sintetici che riflettono le caratteristiche degli interventi che comprendono queste soluzioni. Gli interventi che considerano i *retrofit* dei sistemi di facciata si riferiscono a varie configurazioni, operanti in termini di supporto strutturale, comportamento statico o dinamico, organizzazione geometrica, esposizione, trasparenza (Juaristi *et al.*, 2018). In particolare, trattandosi di edifici esistenti, le soluzioni più affidabili dipendono da morfologia e consistenza materiale dell'oggetto. La composizione del sistema di facciata dipende fortemente dalla connotazione dell'involucro esistente, richiamando numerosi aspetti come la geometria globale dell'edificio (numero di piani, nodi di connessione, posizione e dimensione delle aperture, possibili vincoli), la disposizione delle unità spaziali interne (riscaldate/non riscaldate, o spazi primari e accessori) e le tecniche costruttive (materiali, spessori degli strati).

Per facilitare il processo di individuazione di soluzioni praticabili tra diverse alternative di intervento, è stato sviluppato un *framework* di supporto. Il *framework* si basa sulla combinazione di criteri che si riferiscono a tre ambiti di valutazione principali: la sostenibilità ambientale (ES), la compatibilità architettonica e tecnologica dell'intervento (CO) e la valenza sociale (SV).

Tali ambiti, strutturati complessivamente in 9 aree e 14 criteri, descrivono le esternalità dell'intervento, gli effetti sulla percezione del patrimonio costruito, la fattibilità e l'efficienza. In particolare, l'area CO affronta la sostenibilità intrinseca dell'intervento in relazione alle caratteristiche tecniche e alla funzionalità dell'edificio esistente, affrontando quindi la reversibilità dell'intervento e l'invasività dell'intervento, come stima del grado di interferenza dell'intervento con i materiali e i componenti dell'edificio esistente (Stival *et al.*, 2025).

APPLICAZIONE

La metodologia sviluppata è stata applicata al caso studio del Villaggio di Panzano, situato nel comune di Monfalcone in Friuli-Venezia Giulia. Questo caso studio è stato condotto nell'ambito del progetto PNRR, iNEST-Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 - City, Architecture, Sustainable Design, RT2 - Heritage, recovery, conservation per il significato storico e culturale del patrimonio edilizio, in ragione degli obiettivi di pianificazione dell'amministrazione locale e del potenziale di riproducibilità, alla scala dell'intero Villaggio, di interventi standardizzati applicati a tipologie edilizie ricorrenti. Il quartiere residenziale di Panzano, realizzato a partire dal 1907 per i dipendenti e gli operai impiegati nel cantiere navale di Monfalcone, era uno dei più importanti impianti a livello mondiale negli anni '30 (Barillari e Stival, 2022). La formazione del quartiere aderiva a criteri di opportuno dimensionamento degli alloggi e qualità dei relativi servizi, fornendo abitazioni con standard minimi di salubrità, abitabilità e dotazioni tecniche in tutte le abitazioni operaie.

FIGURA 01 – P. 132

Dopo la Prima Guerra Mondiale, il quartiere subì una ristrutturazione e un'ulteriore fase di sviluppo, comprendendo nuove tipologie edilizie per le famiglie operaie e assumendo così la configurazione attuale. Dagli anni '80, nessuna azione di manutenzione coordinata è stata eseguita sul Villaggio di Panzano: ciò ha comportato diverse e, in alcuni casi, incongrue modificazioni da parte della proprietà – la società del cantiere navale prima, successivamente il Comune di Monfalcone e i singoli privati – con conseguente perdita di uniformità architettonica.

I tipi edilizi nel villaggio operaio mostrano un numero variabile di unità, dimensione degli alloggi, disposizione e qualità architettonica, sebbene quest'ultima faccia costantemente riferimento al concetto di campagna urbanizzata, in particolare al tipo *cottage* (Valcovich e Gadaleta, 2017). Il principio che governa la pianificazione del villaggio si riferisce a un tessuto estensivo, dove le abitazioni e i lotti di pertinenza mantengono una forte indipendenza e autonomia. In particolare, la dimensione minima originale delle singole unità immobiliari, pari a 40 m², indirizza verso l'ipotesi di nuovi interventi che forniscano spazi aggiuntivi per integrare funzioni accessorie. Il tipo "casa a 8 alloggi con accesso separato", presente nel villaggio operaio già in epoca asburgica e reintrodotta nel 1921, rappresenta la tipologia più antica e prevalente nel villaggio operaio.

FIGURA 02 – P. 133

Comprende quattro alloggi al piano terra, replicati al primo piano; ogni unità è indipendente, dispone di un giardino di pertinenza e consta di cucina, due camere da letto, un bagno e uno spazio di circolazione.

FIGURA 03 – P. 134

Le strutture portanti verticali sono costituite da muri in mattoni su fondazioni in cemento armato, mentre i solai e la struttura del tetto sono costruiti in legno. L'edificio presenta dettagli tipici dell'architettura minore rurale, come il tetto aggettante e i balconi esterni di accesso alle unità immobiliari al primo piano (Moravánszky, 2002), in coerenza con le caratteristiche originali.

Queste condizioni iniziali presentano un'opportunità per introdurre nuove caratteristiche tecniche e spaziali in un patrimonio edilizio residenziale esistente, che oggi manifesta una necessità di miglioramento dei livelli di comfort. La ricerca si concentra sulla valutazione dei gradi di trasformazione del tipo, considerando la riconfigurazione della distribuzione spaziale, dei sistemi di facciata, o di entrambi. In particolare, l'aggiunta di nuovi spazi modulari e apribili, applicati strutturalmente come aggetti e utilizzabili come giardini d'inverno, potrebbe contribuire a migliorare significativamente l'apporto di aria fresca dall'esterno, modulando l'illuminazione naturale e, in conclusione, migliorando le condizioni di comfort e di vivibilità. L'intervento di efficientamento dell'involucro verticale, con eventuale sostituzione delle aperture trasparenti, prelude ad un incremento significativo degli attributi di sostenibilità ambientale e una mitigazione del discomfort termico: un rivestimento termico garantisce reversibilità e una limitata invasività degli interventi.

Prevedendo una facciata additiva, in *offset* rispetto all'involucro originario, l'intervento comporta la modifica tanto degli spazi primari che dei secondari, con effetti sulle prestazioni energetiche, incrementando i possibili profili di fruizione e garantendo quindi una maggiore flessibilità. L'ampliamento dell'involucro definisce nuovi livelli di comfort, consente di collocare funzioni secondarie, fungendo al contempo da tampone in grado di controllare i carichi termici. D'altra parte, l'ampliamento incide sulla tipologia originale, comportando una variazione rilevante anche per le murature portanti.

FIGURA 04 – P. 135

Più in generale, l'ipotesi di nuovi volumi in parte alloctoni rispetto alla configurazione originaria, ad integrazione di funzioni primarie e secondarie, produce un nuovo *layout* secondo cui, con l'ampliamento consentito a ciascuna unità immobiliare, si aumenta il rischio di perdita di leggibilità del tipo edilizio. Sono possibili interferenze tra la gestione dei lavori e la continuità della fruizione abitativa, ed eventuali effetti significativi sulle unità tecnologiche esistenti. Gli effetti sulle prestazioni energetiche variano a seconda l'uso previsto per i nuovi spazi, quindi con l'intensità energetica ad essi associata.

La valutazione degli interventi che prevedono la creazione di un nuovo involucro separato presenta opportunità per l'impiego di materiali innovativi con caratteristiche sostenibili. Tra questi, i più significativi sono i materiali a proprietà mutevoli e i materiali a scambio energetico: ad esempio, dispositivi di schermatura solare intelligenti che non richiedono componenti meccanici per il movimento e la regolazione, materiali a comportamento dinamico con elevata capacità di calore latente e fotovoltaici integrati nei componenti edilizi (Clifford *et al.*, 2017; Debbarma *et al.*, 2017; Kuru *et al.*, 2021; Perino e Serra, 2015). L'attuale divario tra la fase di ricerca sperimentale e l'applicazione architettonica rappresenta sia una limitazione che una sfida per avviare il trasferimento tecnologico all'industria delle costruzioni. Inoltre, l'adattabilità e la flessibilità di questi materiali, combinate con la loro capacità di modificare il comportamento in base agli agenti esterni, sono di significativo interesse negli interventi che mirano a riformulare

le condizioni di comfort partendo dalle prestazioni dell'involucro edilizio. Di grande interesse risulta l'opportunità correlata all'implementazione di serre solari, che fungono anche da spazi-cuscinetto o soglia tra interno ed esterno: ad un controllato miglioramento delle prestazioni energetiche, si aggiunge il miglioramento della qualità dello spazio domestico, permettendo una modulazione multiscala della relazione tra ambienti privati, livelli di introspezione e spazi comuni.

Il retrofit dei sistemi di facciata permette di incrementare le prestazioni degli involucri edilizi esistenti, offrendo una serie di vantaggi non limitati alle prestazioni energetiche e alla mitigazione del cambiamento climatico, ma che integrano aspetti architettonici e di ridefinizione degli spazi interni. Il tema della trasformazione e del rinnovamento del vasto patrimonio edilizio è un argomento centrale nella cultura architettonica contemporanea. In questo contesto, l'interazione tra spazio, tipologia e sistema edilizio è vista come un valore aggiunto rispetto ai temi della conservazione o della trasformazione, in grado di riconoscere le capacità rigenerative-trasformative dell'edificio, dei suoi spazi e dei suoi materiali.

La concezione del *framework* presentato nello studio condotto rappresenta uno strumento utile per semplificare il processo di selezione degli interventi di riabilitazione, e può essere utilizzato per confrontare rapidamente e facilmente le prestazioni e le criticità delle diverse soluzioni possibili. Il *framework* può anche essere utilizzato per classificare i sistemi di facciata per identificarne i punti di forza e di debolezza.

Riferimenti bibliografici

- ARSP Architekten (2018) *Villa Fleisch. Umbau und Erweiterung eines Siedlungshauses aus dem Jahr 1929*. Disponibile su: <https://www.arsp-architekten.eu/projekte/VF/25.html> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).
- Barillari, D., Stival, C.A. (2022) 'The industrial heritage of the Trieste Shipyard in Monfalcone. Restoring the garden-city model in the residential typologies of the Panzano District', in *Journal of Architectural Conservation*, 28(3), pp. 217-242. Disponibile su: <https://doi.org/10.1080/13556207.2022.2057092>.
- Clifford, D.T., Zupan, R.J., Brigham, J.C., et al. (2017). 'Application of the dynamic characteristics of shape-memory polymers to climate adaptive building facades', in *Proceedings of the 12th Energy Forum on Advanced Building Skins*, Berna, 2 - 3 ottobre, pp. 171-178. Disponibile su: <https://durham-repository.worktribe.com/output/1146351> (Ultimo accesso: 23 settembre 2025).
- Debbarma, M., Sudhakar, K., Baredar, P. (2017) 'Comparison of BIPV and BIPVT: A review', in *Resource-Efficient Technologies*, 3(3), 263-271. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.11.013>.
- Giove, S., Rosato, P., Breil, M. (2011) 'An Application of Multicriteria Decision Making to Built Heritage. The Redevelopment of Venice Arsenal', in *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 17, pp. 85-99. Disponibile su: <https://doi.org/10.1002/mcda.455>.
- GutGut (2009) *PANELÁK*. Disponibile su: <https://www.gutgut.sk/PANELAK> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).
- Juaristi, M., Gómez-Acebo, T., Monge-Barrio, A. (2018) 'Qualitative analysis of promising materials and technologies for the design and evaluation of Climate Adaptive Opaque Façades', in *Building and Environment*, 144(May), pp. 482-501. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.028>.
- Kuru, A., Oldfield, P., Bonsor, S., et al. (2021) 'Performance prediction of biomimetic adaptive building skins: Integrating multifunctionality through a novel simulation framework', in *Solar Energy*, 224, pp. 253-270. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.012>.
- Lacaton & Vassal (2008) *Maison Latapie, Floirac*. Disponibile su: <https://www.lacatonvassal.com/index.php?idp=25> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).
- Lacaton & Vassal (2011) *Transformation de la Tour Bois le Prêtre - Paris 17 - Druot*. Disponibile su: <https://www.lacatonvassal.com/index.php?idp=56#> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).
- Limoncin, P., Bisiani, T., Stival, C.A. (2025) 'Façade Additive Strategies to Foster a Wider Concept of Comfort', in A. Róžański, Q.-B. Bui, Ł. Sadowski, M. T. Tran (a cura di), *Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Development in Civil, Urban and Transportation Engineering*. Singapore: Springer Nature, pp. 177-187.
- Moravánszky, Á. (2002) 'Edilizia popolare e città nell'Europa centrale del Novecento', in P. Di Biagi, E. Marchigiani, A. Marin (a cura di), *Trieste '900. Edilizia sociale, urbanistica, architettura. Un secolo dalla fondazione dell'Ater*. Cinisello Balsamo: Silvana editoriale, pp. 34-47.
- Paris, S., Bianchi, R. (2019) *Ri-abitare il moderno. Il progetto per il rinnovo dell'housing*. Macerata:Quodlibet.
- Patterson, M. (2022) 'Resilience by design: building facades for tomorrow', in E. Gasparri, A. Brambilla, G. Lobaccaro et al. (a cura di), *Rethinking Building Skins: Transformative Technologies and Research Trajectories*. Cambridge: Woodhead Publishing, pp. 359-375. Disponibile su: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822477-9.00002-4>.
- Perino, M., Serra, V. (2015) 'Switching from static to adaptable and dynamic building envelopes: A paradigm shift for the energy efficiency in buildings' in *Journal of Facade Design and Engineering*, 3(2), pp. 143-163. Disponibile su: <https://doi.org/10.3233/fde-150039>.
- Stival, C.A., Bisiani, T., Limoncin, P. (2025) 'Criteria for enhancing comfort and liveability conditions in homogenous built contexts through innovative façade interventions', in *Architecture, Structures and Construction*, 5(1), 14. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s44150-025-00131-9>.
- Valcovich, E., Gadaleta, F. (2017) *Catalogo Panzano 1950-2017*. Monfalcone: Comune di Monfalcone (GO).
- Virtuel Architecture (2009) *Requalification d'une Cité de 264 logements en 4 immeubles / Bondy*. Disponibile su: <https://www.virtuel.fr/requalification-dune-cite-de-264-logements-en-4-immeubles> (Ultimo accesso: 19 settembre 2025).



FIGURA 01

Villaggio operaio di Panzano, vista del tessuto insediativo.
Dettaglio di ortofoto, Google Maps, 2025.

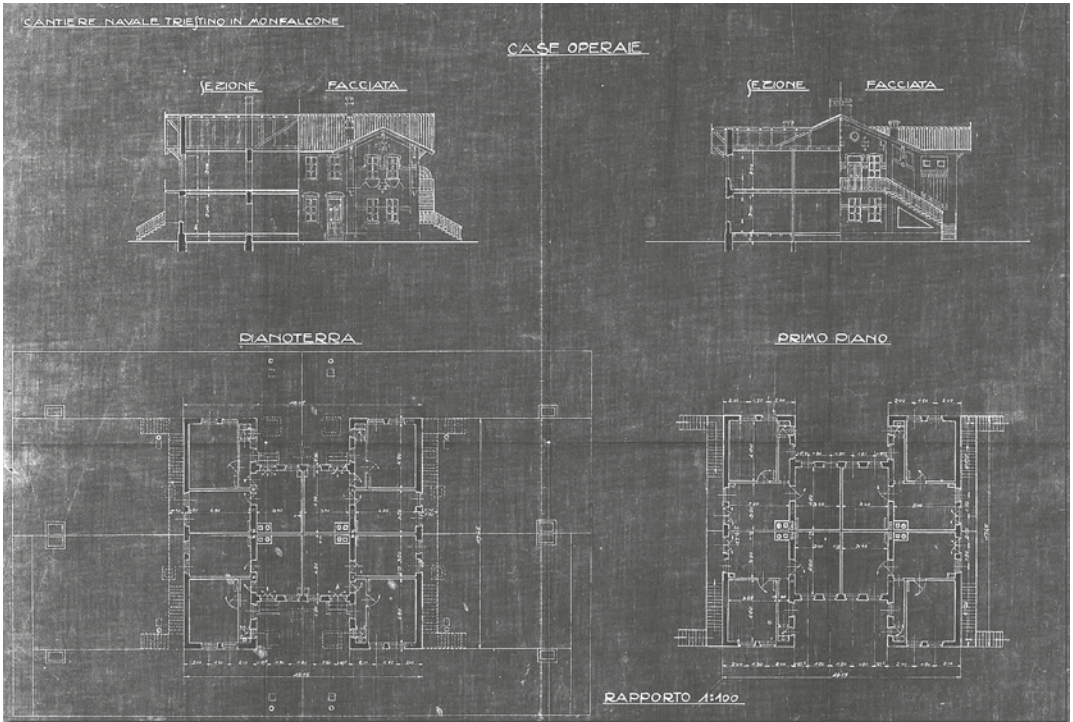


FIGURA 02

Progetto del tipo "casa a 8 alloggi con accesso separato".
Archivio Storico del Comune di Monfalcone, s.d.



FIGURA 03

Edifici del tipo “casa a 8 alloggi con accesso separato” fotografati dalla torre dell'acquedotto.

Archivio fotografico del Consorzio Culturale del Monfalconese, 1920 circa.

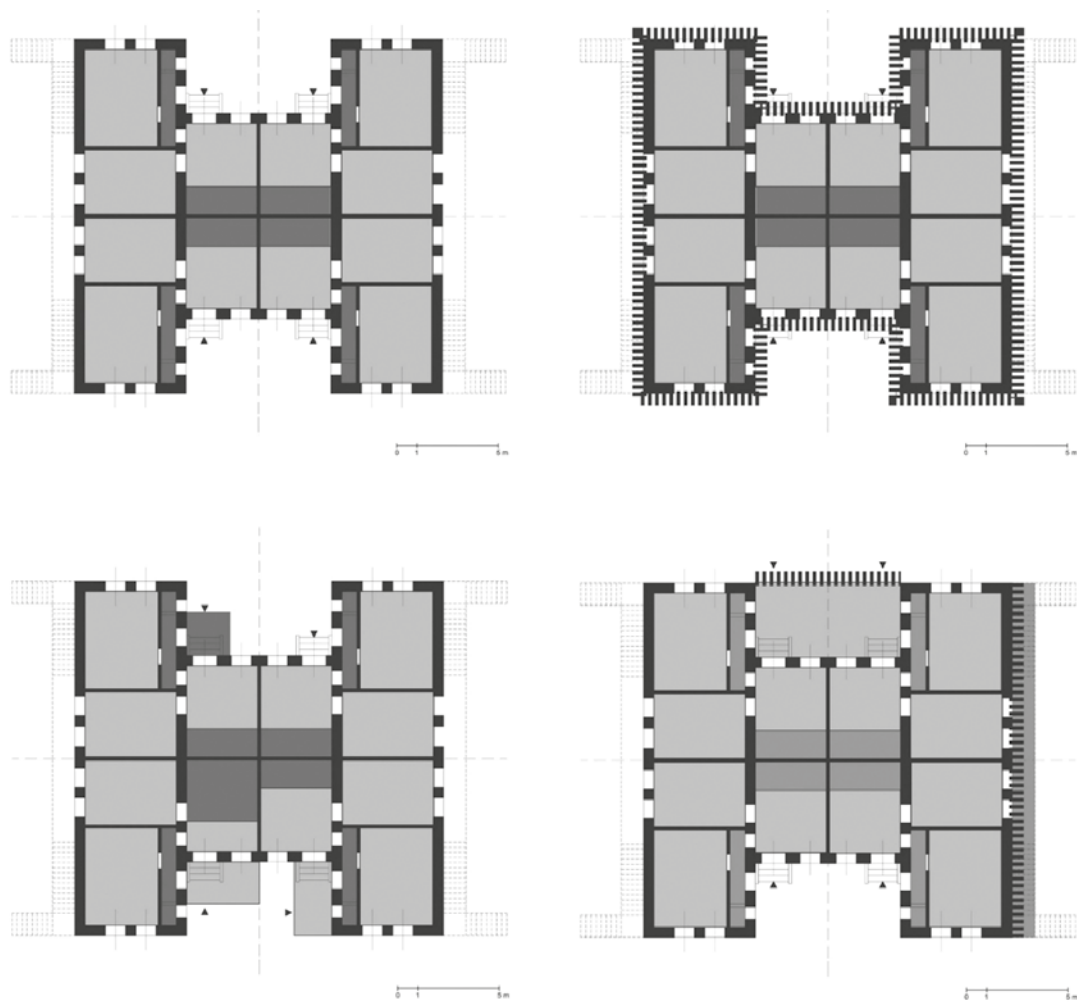


FIGURA 04

Concept di possibili interventi sul tipo edilizio a 8 alloggi nel quartiere di Panzano a Monfalcone. In senso orario, da sinistra in alto: 1. tipo edilizio originario; 2. intervento in adiacenza sull'involucro verticale; 3. realizzazione di facciate additive con creazione di nuovi spazi primari; 4. realizzazione di facciate additive, con creazione e rinnovamento dell'intero layout originario. In grigio chiaro, gli spazi primari; in grigio scuro, gli spazi ancillari; tratteggiata, le unità tecnologiche oggetto di modifica rispetto alla configurazione originaria. P. Limoncin, T. Bisiani, C.A. Stival, 2025.

Sezione 2

GRUPPO DI LAVORO

Coordinatori	Pierpaolo Campostrini Sara Di Resta Paolo Faccio Laura Rappa Enrico Rinaldi
--------------	---

Università Iuav di Venezia	Maddalena Bassani Elena Tesser
-------------------------------	-----------------------------------

CORILA	Pierpaolo Campostrini
--------	-----------------------

Alma Mater Studiorum Università di Bologna	Vanessa Assumma Isabella Giovanetti Ilaria Innocenti
---	--

CNR-ISAC Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima	Alessandra Bonazza Fernanda Prestileo Alessandro Sardella Mariangela Zevola
---	--

Fondazione LINKS	Rojin Bayat Elios De Maio Massimo Migliorini
------------------	--

Politecnico di Torino	Jacopo Fiorenza
-----------------------	-----------------

Fondazione PIN	Franco Nicolucci Luca Pezzati
----------------	----------------------------------

Università Ca' Foscari di Venezia	Andrea Campostrini Elena Ghedini Sabrina Manente Federica Menegazzo Michela Signoretto
--------------------------------------	--

Università di Perugia	Alessandro di Michele
-----------------------	-----------------------

Universitat Politècnica de València	Pilar Bosch-Roig Agustí Sala-Luis
--	--------------------------------------

Co.New Tech. Srl	Fabrizio Benvenuti Luca Benvenuti
------------------	--------------------------------------

Relazioni

a cura di

Pierpaolo Campostrini
Sara Di Resta
Paolo Faccio
Laura Rappa
Enrico Rinaldi

Capitolo 4



Definire e misurare i fenomeni concorrenti è essenziale, se si vuole attuare qualsiasi forma di gestione o di pianificazione delle future evoluzioni.

Patrimonio, rischio e nuove tecnologie

Autore Pierpaolo Campostrini

Affiliazione CORILA



San Marco, Venezia.
Barriere in vetro a protezione dall'acqua alta.
P. Campostrini, 2024.

Introduzione

Nella descrizione della Enciclopedia Treccani della Pianura Padana, come in quella della Regione del Veneto, del Friuli-Venezia Giulia, del Trentino-Alto Adige, la parola “fragile” non viene utilizzata. Essa, quindi, non appare essere “costitutiva” per questi territori, che possono essere altrimenti descritti. Diversamente, nelle cronache dei giornali, questo aggettivo è sempre più spesso associato al Nord-Est, quando si riporta, con frequenza crescente, di eventi naturali che conducono a situazioni di difficoltà o, peggio, a veri e propri disastri. In fisica e nella scienza dei materiali, il termine “fragile” si riferisce a un materiale o a un oggetto che si rompe facilmente sotto l'azione di una forza, senza mostrare deformazione plastica preliminare. La fragilità indica quindi una scarsa capacità di assorbire energia prima di frantumarsi o di subire danni irreparabili. Al contrario, la resilienza si definisce come la capacità di un materiale di deformarsi in modo elastico e di tornare alla sua forma originale dopo aver subito uno sforzo o una deformazione. Descrive quindi la capacità di assorbire energia durante una deformazione elastica e di resistere a shock, urti o tensioni senza subire danni permanenti.

Il termine “resilienza” negli ultimi tempi si è diffuso anche nel linguaggio comune, ma non sempre a proposito, come peraltro quello di “rischio”. Trattando del patrimonio architettonico e paesaggistico e della sua tutela, diviene necessario quindi partire da un'operazione che appare di “pulizia semantica”, per individuare un linguaggio appropriato, sulla base del quale sia inoltre possibile offrire descrizioni quantitative dei fenomeni in atto. Infatti, definire e misurare i fenomeni concorrenti è essenziale, se si vuole attuare qualsiasi forma di gestione o di pianificazione delle future evoluzioni. Partiamo infatti dalla considerazione (ovvia, ma spesso tralasciata) che la fotografia di una porzione di territorio in un determinato istante è il risultato di tanti fenomeni sovrapposti che hanno agito nel passato su scale temporali diverse: se non li comprendiamo singolarmente non sapremo mai gestire l'evoluzione nel loro complesso.

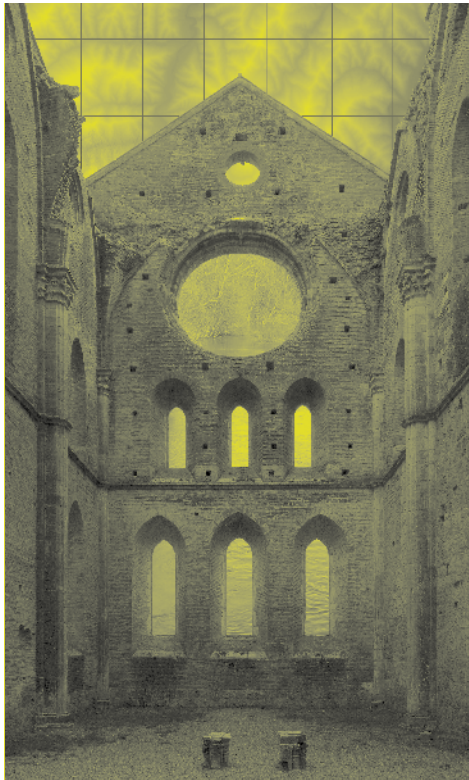
I fenomeni meteorologici sono soggetti ad un cambiamento veloce e le frequenze degli eventi più intensi vanno ad aumentare vistosamente: altrettanto velocemente deve aumentare la nostra capacità di discernere, di misurare, di modellare e quindi anche di prevedere. Seguendo questo approccio, in questa sezione del volume abbiamo voluto raccogliere contributi diversi fra loro, che mostrano strumenti innovativi non sono nelle analisi, ma anche nella capacità di mettere immediatamente “in rete” le consapevolezze acquisite, per farle diventare strumenti di gestione. Infine, si presenta l'avanzamento di uno strumento capace di dare indicazioni concrete, operative per l'analisi dei rischi e la scelta delle più adatte azioni per ridurlo. In questo modo, riconoscendo e quantificando i fenomeni, confrontando e mettendo in connessione le conoscenze, valutando quantitativamente rischi e soluzioni, potremmo rendere il territorio del Nord-Est (e non solo) meno “fragile” e più “resiliente”.

Autori

Vanessa Assumma
Isabella Giovanetti
Ilaria Innocenti

Affiliazione

Alma Mater Studiorum
Università di Bologna



Un palinsesto da proteggere e riscrivere.
I. Innocenti, 2025, elaborazione su base immagini
Wikimedia Commons.

La valutazione economica del patrimonio culturale tra rischio e resilienza

La valutazione economica del patrimonio culturale è un tema cruciale per supportare decisori pubblici e stakeholder privati nella definizione di strategie a favore dei beni culturali e paesaggistici, in un contesto caratterizzato da crescente complessità e incertezza.

Il contributo sviluppa un'analisi della letteratura scientifica volta a esplorare il ruolo della valutazione economica dei beni culturali, monetaria e non monetaria, e in relazione al ruolo dei Sistemi Informativi Geografici (GIS). L'analisi della letteratura restituisce lo stato dell'arte dell'ultimo decennio in termini di contenuti, tendenze emergenti ed eventuali lacune che possano condurre all'apertura di nuovi orizzonti di ricerca.

Il valore del patrimonio culturale è sempre più al centro di strategie di preservazione, gestione e valorizzazione sia istituzionale, sia *place-oriented*. In Italia, la Pubblica Amministrazione (PA) è stata interessata da importanti riferimenti normativi¹ che hanno configurato nel tempo un sistema di gestione "manageriale" del patrimonio culturale. A livello europeo, il patrimonio culturale è riconosciuto come uno dei fattori chiave per promuovere lo sviluppo sostenibile², per la ripresa e per l'aumento della resilienza del territorio³, ma le incertezze odierne, (es. cicli economici, emergenza climatica) possono causare implicazioni non banali per la ripresa, talvolta ravvicinate, a discapito delle realtà locali.

La disciplina dell'estimo e della valutazione può supportare attori pubblici e stakeholder nella gestione del patrimonio culturale. In economia, l'attribuzione di un valore economico ai beni culturali si fonda sul paradigma del Valore Economico Totale (VET)⁴ che distingue il valore d'uso e di non uso e indirizzando l'impiego di tecniche valutazione economica monetaria, non monetaria e integrata. Numerosi sono gli studi e i rapporti nazionali e internazionali che monitorano l'impatto economico dei beni culturali⁵, ma sembra continuare a mancare uno stato dell'arte che integri valore multidimensionale, visione multi-rischio, ed esperienze di cooperazione tra ricerca, istituzione e libera professione. Questo studio intende colmare parte di questo *gap*.

L'analisi della letteratura è sviluppata secondo il metodo PRISMA⁶ e considerando tre filoni principali: (i) valutazione economica monetaria; (ii) valutazione economica non monetaria (strategica); e i (iii) Sistemi Informativi Geografici (GIS) per la valutazione economica. La raccolta dei documenti è condotta su Scopus tra Luglio e Agosto 2025, limitandola a prodotti in lingua inglese della decade 2015-2025. I documenti sono sottoposti a un'analisi testuale automatizzata attraverso strumenti di *text mining*, per identificare la frequenza e la co-occorrenza delle parole chiave all'interno del *corpus*. Il conteggio delle *keyword* è effettuato calcolando il numero totale di

occorrenze di ciascun termine all'interno del testo. L'elaborazione linguistica è eseguita utilizzando la libreria Apache OpenNLP⁷. Le *keyword* estratte sono rappresentate in mappe bibliometriche con VOSviewer⁸.

METODI DI VALUTAZIONE ECONOMICA MONETARIA

La prima interrogazione su Scopus, riportata nella Tabella 01, ha analizzato le tecniche di valutazione economica monetaria più impiegate per il patrimonio culturale e il tipo di valore stimato, ovvero il valore economico-sociale oppure il valore economico-finanziario (SQ₁). Tra i 16 risultati, 12 trattano il valore finanziario e quattro il valore sociale. Si osserva un buco temporale tra il 2017 e il 2021, e una ripresa dal 2021 al 2025. Per esempio: (i) Il Choice Experiment (CE) e l'Analisi di Contingenza (CV) per conoscere la preferenza pubblica verso programmi alternativi di conservazione stimando la Disponibilità a Pagare - DAP (Yung e Chan, 2015); (ii) La Compensazione per Eliminazione (CFE) in sostituzione ai metodi precedenti per stimare il valore di non uso dei siti culturali (Ben-Malka and Poria, 2020). Aggiungendo "risk" alla stringa i risultati si riducono a due, tra cui una CV sviluppata con il Modello Dicotomico a Doppio Limite per ridurre l'incertezza nella stima del beneficio economico della valorizzazione di un itinerario storico (Oppio *et al.*, 2018). Successivamente, è stato esplorato il valore di costo relazionale al rischio e alle sue componenti (SQ₂), ottenendo sette risultati di cui tre validi. Per esempio, nel paper (Atalić *et al.*, 2021) è stato stimato il costo del danno post-terremoto alla scala edilizia, considerando la metodologia della World Bank⁹, evidenziando sia la difficoltà di stima del costo preciso del danno, specie quando il processo di ricostruzione è in corso, sia nel confrontare il costo del danno con quelli stimati per altri terremoti verificatisi nella stessa regione.

L'ultima interrogazione (SQ₃) ha investigato il tema degli strumenti finanziari e degli investimenti che concernono i beni culturali e le ricadute sul mercato (SQ₃). Includendo "risk", si ottiene un solo risultato (Pickerill, 2021). Omettendolo, i risultati diventano quattro. L'Analisi Costi-Benefici (ACB) e i Partenariati Pubblico-Privati (PPP) sono gli strumenti riconosciuti per favorire soluzioni di riuso adattivo del patrimonio architettonico, la fattibilità tecnico-economica e per supportare la successiva fase gestionale (Bonioti, 2018).

TABELLA 01 – P. 148 FIGURA 01 – P. 149

METODI DI VALUTAZIONE ECONOMICA NON MONETARIA

L'analisi riportata nella Tabella 02 ha investigato quali sono le tecniche non monetarie più impiegate per il patrimonio culturale e la dimensione del valore trattata (SQ₁), restituendo 14 prodotti di cui 13 ritenuti validi. Sette prodotti trattano il valore sociale, mentre i rimanenti il valore economico. Aggiungendo il termine "risk" i prodotti si riducono a tre di cui due validi. Gran parte delle applicazioni si focalizzano sulla valutazione dei Servizi Ecosistemici (SE) con approcci aperti alle comunità. Se la scelta della tecnica dipende dal problema da valutare, questi studi riconoscono che la combinazione di più metodi (es. indicatori quali-quantitativi, GIS, metodi econometrici) e l'inclusione degli obiettivi di sostenibilità può facilitare la mappatura e la quantificazione del valore dei SE, nonché la veicolazione dello stesso nelle politiche territoriali (Romanazzi *et al.*, 2023).

La seconda e la terza interrogazione hanno investigato le Analisi Multi-criteri (MCA) (SQ₂) e l'Ottimizzazione Multi-Obiettivo - MOO (SQ₃) per esplorare la loro applicabilità in questa tematica. Sono stati ottenuti

rispettivamente otto prodotti per la prima e un prodotto per la seconda interrogazione. Dai risultati emerge l'impiego congiunto di MCA e GIS per valutare fattori di protezione, scenari alternativi di gestione paesaggistica, l'idoneità di edifici storici per il riuso adattivo (Varga *et al.*, 2018) o integrato dalla modellazione idraulica per localizzare *Nature-Based Solutions* (NBS) sul territorio (Wang *et al.*, 2025). Ad oggi la MOO non è molto esplorata in questo settore, a differenza di altre discipline. L'analisi su Scopus ha restituito comunque un prodotto alquanto pertinente, ovvero l'impiego di un Algoritmo Genetico di Ordinamento Non Dominato (NSGA-II) per ottimizzare e facilitare la ricerca di informazioni in archivi digitali a supporto della PA (Dias and Lopes, 2023).

TABELLA 02 – P. 150 FIGURA 02 – P. 151

IL RUOLO DEL GIS PER LA VALUTAZIONE DEL PATRIMONIO CULTURALE

L'analisi riportata nella Tabella 03 evidenzia il ruolo del GIS nella valutazione culturale ed economica del patrimonio, come supporto conoscitivo e operativo in contesti di vulnerabilità. Una review recente ne mostra potenzialità e limiti nella conservazione, valorizzazione e gestione del rischio, ma non viene affrontata la dimensione valutativa (Yu *et al.*, 2025). Da qui le due domande di ricerca: (i) come il GIS possa supportare la valutazione economica del rischio e degli interventi di conservazione del patrimonio culturale; (ii) il ruolo del GIS in un'ottica di valorizzazione culturale del patrimonio (Tab. 02). La prima interrogazione (SQ1) ha restituito 2557 risultati, con un totale di 15415 *keywords* estratte che si riducono a 1353 connesse da cinque co-occorrenze (8.8%). Si osserva un rapporto sparso tra le *keywords* anche se è il più alto rispetto alle analisi successive. Gli otto *cluster* mappati con VOSviewer rappresentano il cambiamento climatico, le politiche sociali e le questioni economiche legate ai rischi ambientali. Aggiungendo "cultural", si rilevano 246 risultati con 1484 *keywords*, delle quali 68 sono connesse da tre co-occorrenze (4.58%). In VOSviewer, i sei *cluster* si riferiscono allo sviluppo sostenibile, alla pianificazione territoriale e alla crescita urbana. Con "heritage" si identificano 55 testi con 473 *keywords* iniziali e nove *keywords* connesse risultanti dalla scelta di tre co-occorrenze (1.90%) che sottolinea la scarsa presenza di testi in merito alle tematiche di ricerca. L'ambito principale di questa stringa è la valutazione qualitativa dei rischi ambientali. Aggiungendo "risk" alla stringa, si ottengono 31 prodotti, con 262 parole chiave e 23 connesse con almeno due co-occorrenze (8.8%). In VOSviewer si osserva che i *cluster* principali, ovvero l'analisi del rischio e lo sviluppo sostenibile, sono collegati dai termini "cultural heritage" e "data acquisition". I risultati sono stati filtrati considerando i titoli, gli abstracts, attinenza con la tematica e reperimento, portando alla selezione di cinque prodotti significativi. L'analisi sul ruolo del GIS per la valutazione del valore culturale (SQ5) ha restituito 110 prodotti con 923 *keywords* iniziali, 41 *keywords* connesse e derivanti da tre co-occorrenze (4.44%). Nella mappa VOSViewer, il *cluster* del patrimonio culturale detiene una posizione centrale. Inserendo "risk" alla tripla si rilevano 46 prodotti, con 460 *keywords* iniziali e 12 connesse con almeno tre co-occorrenze (26 %) evidenziando una ricerca sempre più mirata (Fig. 3). L'analisi ha portato a estrarre sette prodotti considerando i criteri sopra. Le aree di ricerca considerate sono *Engineering, Arts and Humanities*. Per la prima stringa è stata considerata anche *Environmental Science* per includere anche contributi qualitativi afferenti alla tematica.

TABELLA 03 – P. 152

Dai 12 testi analizzati emerge l'ampio uso del GIS nella valutazione culturale del patrimonio costruito, soprattutto per la mappatura dei rischi geologici e lo studio di aspetti morfometrici a supporto della pianificazione urbana. L'Historical GIS (HGIS), anche integrato con HBIM, risulta utile per catalogare, monitorare e pianificare interventi di restauro (Barrile e Genovese, 2024; Xu et al., 2024).

Inoltre, le autrici evidenziano un buon margine di sviluppo per l'integrazione di analisi geospaziali e morfometriche con la valutazione economica spazializzata a favore della prioritizzazione di strategie e della stima dei benefici generati in termini di costo del danno evitato.

FIGURA 03 – P. 153

L'analisi della letteratura ha evidenziato tendenze e lacune della valutazione economica dei beni culturali. Dall'analisi è emersa la necessità di adottare approcci di valutazione integrata, il cui successo dipenderà, da un lato, dall'adozione di strumenti quali-quantitativi per analizzare lo stato di fatto e lo stato di diritto alle diverse scale spaziali e temporali, così come di una maggiore relazione tra il valore d'uso e di non uso del bene culturale. Dall'altro, la cooperazione transdisciplinare e la trasparenza del processo potrà favorire l'implementazione di progetti subito bancabili e cantierabili. Questa analisi della letteratura sarà approfondita integrando i prodotti della PA e della libera professione, allo scopo di restituire uno stato dell'arte bilanciato e comprensivo.

Riferimenti bibliografici

- Atalić, J., Uroš, M., Šavor Novak, M., et al. (2021) 'The Mw5.4 Zagreb (Croatia) earthquake of March 22, 2020: impacts and response', in *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(9), pp. 3461-3489. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/S10518-021-01117-V>.
- Barrile, V., Genovese, E. (2024) 'Gis-like environments and hbm integration for ancient villages management and dissemination', in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 41-47. Disponibile su: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W4-2024-41-2024>.
- Ben-Malka, R., Poria, Y. (2020) 'Compensation for elimination: an innovative technique for evaluating the monetary value of cultural heritage sites', *Journal of Heritage Tourism*, 15(2), pp. 228-231. Disponibile su: <https://doi.org/10.1080/1743873X.2019.1619746>.
- Boniotti, C. (2018) 'Public private partnership and change management for built cultural heritage', *Innovative Built Heritage Models - Edited contributions to the International Conference on Innovative Built Heritage Models and Preventive Systems, CHANGES 2017*, pp. 45-52. Disponibile su: <https://doi.org/10.1201/9781351014793-6>.
- Dias, M., Lopes, C.T. (2023) 'Optimization of Image Processing Algorithms for Character Recognition in Cultural Typewritten Documents', *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 16(4). Disponibile su: <https://doi.org/10.1145/3606705>.
- Oppio, A., Maltese, I., Mariotti, I. (2018) 'Integrated Valorization of Cultural Heritage: A Case Study of the Cammino dei Monaci Route', in *Green Energy and Technology*, pp. 401-410. Disponibile su: https://doi.org/10.1007/978-3-319-78271-3_32.
- Pickerill, T. (2021) 'Investment leverage for adaptive reuse of cultural heritage', in *Sustainability (Switzerland)*, 13(9). Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/SU13095052>.
- Romanazzi, G.R., Koto, R., De Boni, A., et al. (2023) 'Cultural ecosystem services: A review of methods and tools for economic evaluation', *Environmental and Sustainability Indicators*, 20, p. 100304. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100304>.
- Varga, D., Vila Subirós, J., Barriocanal, C. et al. (2018) 'Landscape transformation under global environmental change in Mediterranean Mountains: Agrarian lands as a guarantee for maintaining their multifunctionality', *Forests*, 9(1). Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/F9010027>.
- Wang, M., Zhao, J., Su, J., et al. (2025) 'Navigating Flooding Challenges in Historical Urban Contexts: Integrating Nature-Based Solutions with Spatial Multi-Criteria Assessments in Quanzhou', *Land*, 14(3). Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/LAND14030452>.
- Xu, Y., Tong, H., Liu, J., et al. (2024) 'An Assessment of the Urban Streetscape Using Multiscale Data and Semantic Segmentation in Jinan Old City, China', *Buildings*, 14(9). Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/buildings14092687>.
- Yu, Y., Abu Ra'ed, A., Peng, Y., et al. (2025) 'How digital technologies have been applied for architectural heritage risk management: a systemic literature review from 2014 to 2024', *npj Heritage Science*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. Disponibile su: <https://doi.org/10.1038/s40494-025-01558-5>.
- Yung, E.H.K., Chan, E.H.W. (2015) 'Evaluation of the social values and willingness to pay for conserving built heritage in Hong Kong', *Facilities*, 33, pp. 76-98. Disponibile su: <https://doi.org/10.1108/F-02-2013-0017>.

Note

- 1 Riferimenti normativi: D.lgs 112/98, D.lgs 42/2004; D.lgs 368/98; L. 12/2002 - Patrimonio SPA; D.lgs 42/2004; Riforma Franceschini, 2014.
- 2 Cultural Heritage Counts for Europe, Full Report (2015). CHCFE. International Cultural Centre, Kraków, 296. Disponibile su: http://blogs.encaat.org/culturalheritagecountsforeurope/wp-content/uploads/2015/06/CHCFE_FULL-REPORT_v2.pdf.
- 3 European Commission: Directorate-General for Education, Youth, Sport and Culture, Strengthening cultural heritage resilience for climate change – Where the European Green Deal meets cultural heritage, Publications Office of the European Union, 2022, Disponibile su: <https://data.europa.eu/doi/10.2766/44688>.
- 4 Per approfondimenti, v. Pearce e Turner, 1991.
- 5 Esempi: CORDIS (Community Research and Development Information Service); report tecnici del MIC; report di Fondazioni (es. Symbola, Federculture), manualistica e linee guida sui beni culturali (ICOMOS, ICCROM, ISPR, ENEA) ecc.
- 6 PRISMA - Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (2020), <http://www.prisma-statement.org/>. (Per approfondimenti, v. Walkman et al., 2010).
- 7 Apache OpenNLP, <https://opennlp.apache.org/>.
- 8 VOSviewer, <https://app.vosviewer.com/> (Per approfondimenti, v. van Eck et al., 2010)
- 9 World Bank (2010) *Design and Execution of a Damage, Loss and Needs Assessment Guidance Note for Task Managers*. Washington DC: The World Bank.

SQ	Keywords	N° documenti	N° keywords	Soglia di frequenza (%)	N° keywords sopra soglia
SQ1	<i>"social value" or "economic value"</i>	16(14)	139	2	14
	<i>"monetary"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				
SQ1bis	<i>"risk"</i>	2	20	1	20(16)
SQ2	<i>"economic appraisal" OR "cost analysis"</i>	7(3)	167	2	18
	<i>"risk" OR "hazard" OR "vulnerability" OR "damage"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				
SQ3	<i>"investment"</i>	4	30	1	30
	<i>"financial instrument"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				

TABELLA 01

Analisi dei dati Scopus sulla valutazione economica monetaria.
V. Assumma, 2025.

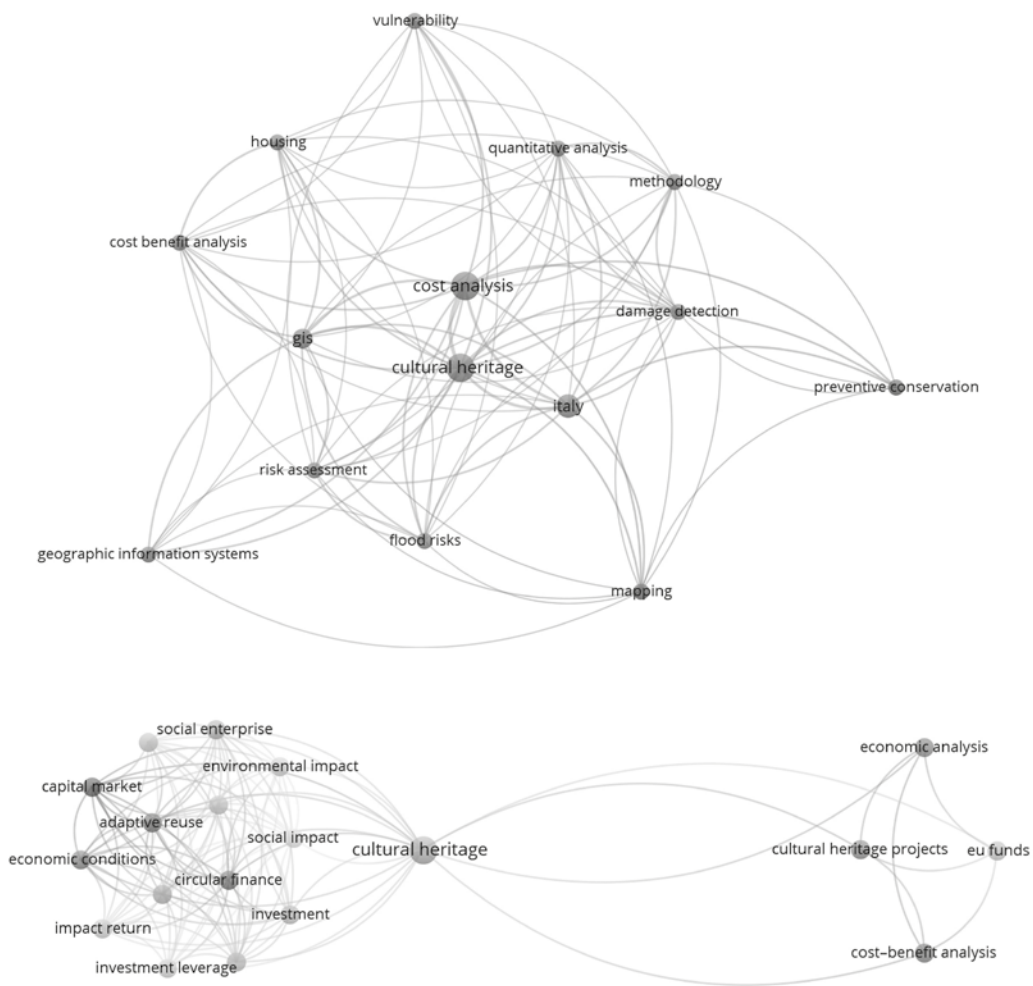


FIGURA 01

Visualizzazione dei risultati su VOSViewer.
V. Assumma, 2025.

SQ	Keywords	N° documenti	N° keywords	Soglia di frequenza (%)	N° keywords sopra soglia
SQ1	<i>"monetary"</i>	2557	15415	5	1353
	<i>"GIS"</i>				
SQ2	<i>"monetary"</i>	246	1484	3	68
	<i>"GIS"</i>				
	<i>"cultural"</i>				
SQ3	<i>"monetary"</i>	55	473	3	9
	<i>"GIS"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				
SQ4	<i>"monetary"</i>	31	262	2	23
	<i>"GIS"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				
	<i>"risk"</i>				

TABELLA 02

Analisi dei dati Scopus sulla valutazione economica non monetaria.
V. Assumma, 2025.

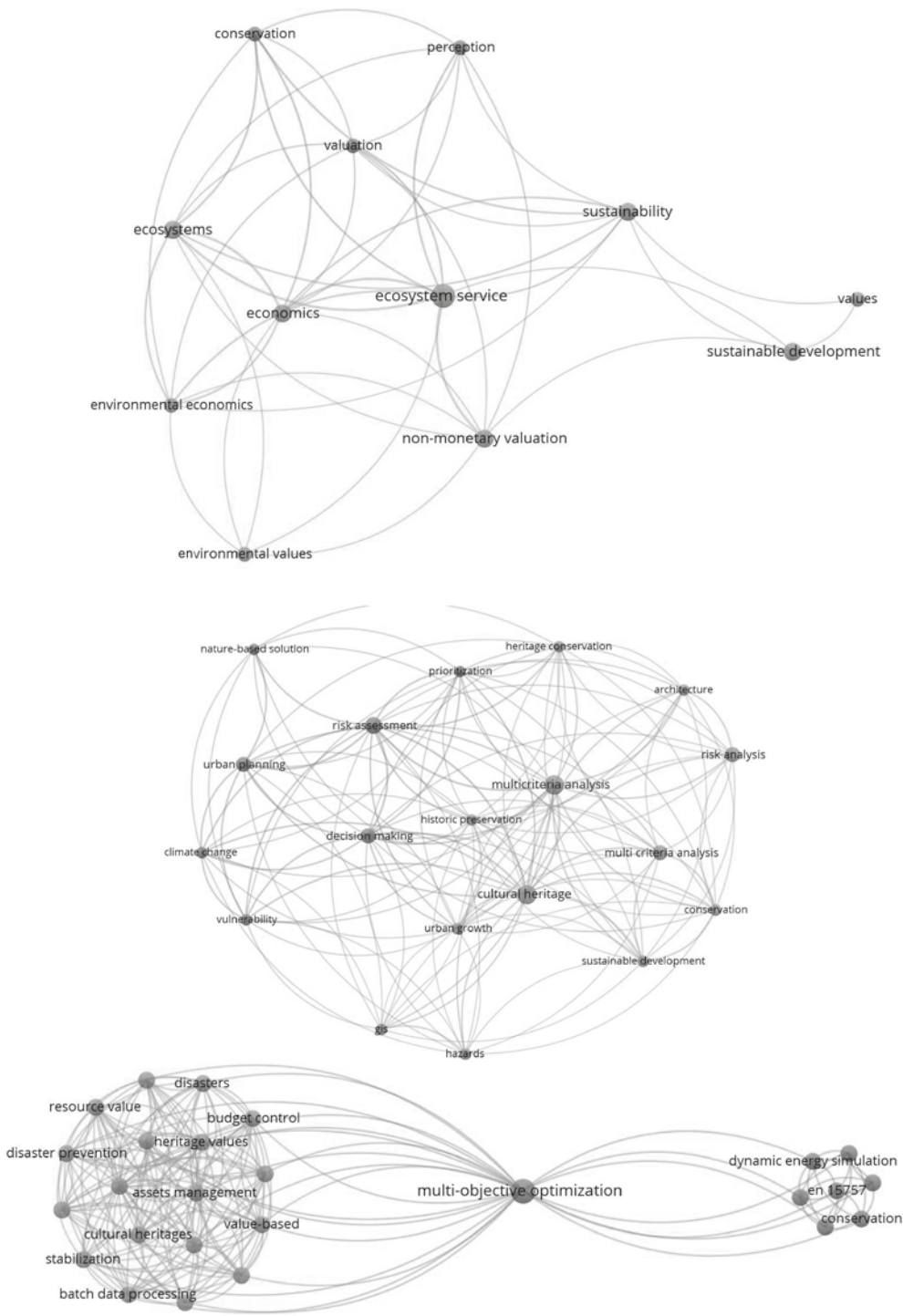


FIGURA 02

Mappatura dei risultati su VOSViewer.
V. Assumma, 2025.

SQ	Keywords	N° documenti	N° keywords	Soglia di frequenza (%)	N° keywords sopra soglia
SQ1	<i>"social value or "economic value"</i>	14 (13)	150	2	14 (12)
	<i>"non-monetary"</i>				
	<i>"evaluation" or "assessment"</i>				
SQ1 bis	<i>"cultural heritage"</i>	3 (2)	18	1	18 (14)
	<i>"risk"</i>				
SQ2	<i>"evaluation"</i>	8	129	2	21(19)
	<i>"multicriteria" or "MCDA"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				
SQ3	<i>"risk"</i>	2(1)	26	1	26
	<i>"evaluation"</i>				
	<i>"multi-objective"</i>				
	<i>"cultural heritage"</i>				

A

SQ	Keywords	N° documenti	N° keywords	Soglia di frequenza (%)	N° keywords sopra soglia
SQ5	<i>"value"</i>	110	923	3	41
	<i>"GIS"</i>				
	<i>"historical heritage"</i>				
SQ6	<i>"value"</i>	46	460	3	12
	<i>"GIS"</i>				
	<i>"historical heritage"</i>				
	<i>"risk"</i>				

B

TABELLA 03

Analisi dei dati Scopus sui sistemi GIS per la valutazione del patrimonio culturale (a, b).
V. Assumma, 2025.

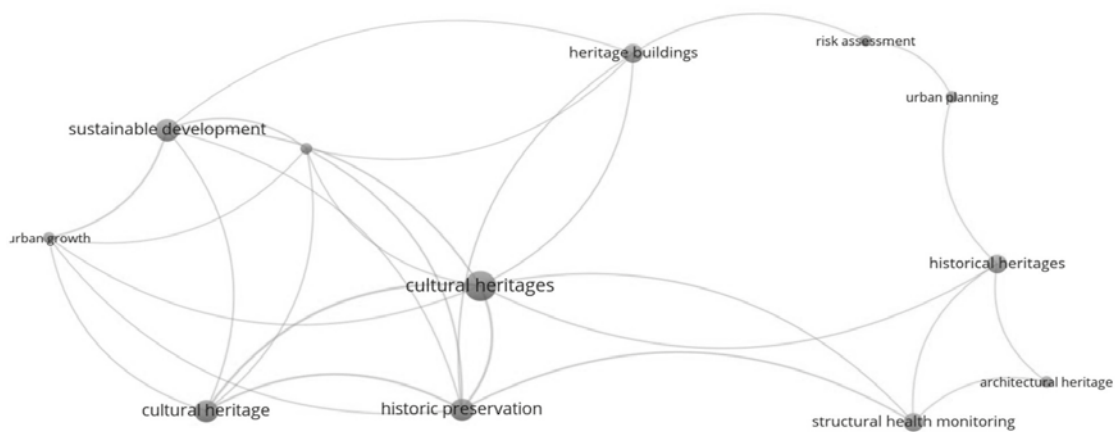


FIGURA 03

Mappa VOSviewer dell'ultima tripletta analizzata.
I. Innocenti, 2025.

Autori	Alessandro Sardella Mariangela Zevola Fernanda Prestileo Alessandra Bonazza
---------------	--

Affiliazione	CNR-ISAC Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima
---------------------	---



Vista dell'isola di Alicudi.
A. Sardella, 2025.

Patrimonio culturale a rischio in un contesto di cambiamento climatico: strumenti e strategie di protezione nei progetti Interreg CE INACO e PNRR CHANGES

I cambiamenti climatici costituiscono una delle sfide più urgenti del nostro tempo: siti archeologici, centri storici, complessi monumentali, ma anche paesaggi, parchi e giardini storici, si trovano a dover fare i conti con fenomeni climatici che ne minano la conservazione, aumentando il rischio di degrado o perdita (Bonazza *et al.*, 2021).

La ricerca sugli impatti dei cambiamenti climatici ha avuto crescente attenzione negli ultimi anni e ha portato a sviluppi significativi riguardo la quantificazione dei danni e la valutazione del rischio. Per riuscire a definire strategie di adattamento e mitigazione del rischio risulta necessario ottenere dati quantitativi sugli impatti osservati e previsti, considerando diversi scenari. Gli approcci utilizzati per la produzione delle proiezioni sono sviluppati sia in relazione ai danni cumulativi lenti (*slow cumulative damage*), dovuti a variazioni graduali e continue; sia in relazione ai rischi associati ad eventi idrometeorologici estremi (*climate extreme*), come alluvioni, precipitazioni intense, siccità prolungate e ondate di calore (Bonazza e Sardella, 2023).

I danni cumulativi lenti sono processi graduali che si sviluppano nel lungo periodo, spesso non immediatamente percepibili, dovuti all'azione combinata di clima e inquinamento atmosferico; il carattere lento di questi danni li rende più insidiosi poiché non destano attenzione immediata, ma col tempo possono determinare perdite irreversibili.

Gli studi per la valutazione degli effetti dei cambiamenti graduali sono stati condotti su processi di degrado quali: recessione superficiale, *soiling* e annerimento, biodeterioramento/accumulazione di biomassa, termoclastismo, cristallizzazione salina. Questi processi sono stati modellizzati attraverso funzioni di danno, ovvero equazioni che correlano parametri climatici (temperatura, precipitazioni, umidità relativa) e di inquinamento atmosferico con la velocità e il grado di deterioramento dei materiali. Tali funzioni consentono di stimare in modo quantitativo i danni cumulativi lenti e di elaborare proiezioni future, con l'obiettivo di prevedere e gestire l'impatto dei cambiamenti climatici. Le principali proiezioni europee sui processi di deterioramento del patrimonio culturale, sia nel futuro prossimo (2021-2050) che in quello più lontano (2071-2100), sono state sviluppate nell'ambito del progetto *Noah's Ark* della Commissione Europea, utilizzando modelli climatici globali e regionali, fornendo un quadro quantitativo dell'impatto atteso. Le funzioni, nonostante la presenza di limiti dovuti alla non adeguata considerazione dei livelli di vulnerabilità o del diverso grado di esposizione dei siti, sono state impiegate anche dal sistema della *Mappa del Rischio del Patrimonio Culturale* gestito dal Ministero della Cultura, utilizzando dati meteo-climatici e di qualità dell'aria per valutare i possibili rischi sui beni culturali presenti in Italia. In un'ottica di conservazione preventiva un elemento

fondamentale da tenere in considerazione è la frequenza con cui i parametri climatici e di inquinamento atmosferico vengono monitorati: i parametri dovrebbero essere misurati quotidianamente, così da consentire valutazioni su base mensile, stagionale e annuale. In questo contesto, le reti di monitoraggio della qualità dell'aria e i servizi europei Copernicus, ovvero il *Climate Change Service* (C3S) e l'*Atmosphere Monitoring Service* (CAMS), rappresentano fonti imprescindibili di dati (Bonazza e Sardella, 2023).

Parallelamente ai danni graduali, il patrimonio è esposto al verificarsi di eventi estremi legati al cambiamento climatico. L'approccio metodologico per lo sviluppo di proiezioni degli impatti e i rischi derivanti dagli eventi estremi, si basa sul concetto di rischio come combinazione di tre componenti: pericolo (*hazard*), vulnerabilità ed esposizione. Le valutazioni, in questo caso, tengono in considerazione la complessità e la diversità delle categorie di patrimonio culturale e naturale. Attraverso lo strumento *Risk Mapping Tool for Cultural Heritage Protection*, sviluppato nell'ambito dei progetti *Interreg Central Europe ProteCH2save* e *STRENCH* dal CNR-ISAC, è possibile produrre mappe storiche e proiezioni future di indici climatici scelti, secondo scenari possibili RCP4.5 e RCP 8.5. La piattaforma che integra dati storici e proiezioni future è stata sviluppata per migliorare la gestione delle risorse e supportare i decisori, le autorità pubbliche, i professionisti del patrimonio e le parti locali interessate nell'attuazione di strategie per la riduzione del rischio (Sardella *et al.*, 2020).

La salvaguardia del patrimonio culturale richiede un approccio integrato e multidisciplinare, capace di riconoscere i fattori di rischio in un contesto ambientale in trasformazione. Per una gestione efficace è fondamentale affrontare sia i danni cumulativi legati al cambiamento climatico e all'inquinamento, sia le emergenze provocate da eventi climatici estremi; la pianificazione deve considerare le caratteristiche specifiche dei territori, valutando vulnerabilità ed esposizione dei beni culturali.

Nel presente contributo sono illustrati gli approcci nello studio dell'impatto degli eventi climatici estremi implementati dal CNR-ISAC, nell'ambito dei progetti *Interreg Central Europe INACO* e *PNRR CHANGES*. Al centro di entrambi i progetti c'è lo sviluppo di soluzioni e strategie per la gestione del rischio, attraverso l'utilizzo della piattaforma *Risk Mapping Tool*, per casi studio rappresentativi del patrimonio culturale e naturale.

IL PROGETTO INACO: STRATEGIE INNOVATIVE PER LA RESILIENZA DEL PATRIMONIO CULTURALE E NATURALE CONTRO I RISCHI CLIMATICI

Il progetto INACO (INnovative strategies for the Adoption of risk management plans to enhance the resilience of sensitive Cultural and natural heritage Objectives against climate hazards in river basin districts) è un'iniziativa finanziata dal programma *Interreg Central Europe*. Coordinato dal CNR-ISAC, l'obiettivo principale è accrescere la resilienza del patrimonio culturale e naturale nei distretti idrografici dell'Europa Centrale nei confronti dei rischi idrometeorologici legati ai cambiamenti climatici. Il progetto, attivo dal 1° giugno 2024 al 30 novembre 2026, coinvolge un consorzio di undici partner beneficiari e sei partner associati che include rappresentanti della comunità scientifica, delle autorità pubbliche, delle piccole e medie imprese e della società civile.

Il partenariato del progetto è così composto:

- Italia: CNR-ISAC, Parco Regionale del Delta del Po;
- Austria: SISTEMA GmbH, University for Continuing Education Krems, BAW Research, Statutory body under public law;

- Repubblica Ceca: Institute of Theoretical and Applied Mechanics;
- Ungheria: Lake Balaton Development Coordination Agency;
- Germania: District Council Forchheim;
- Polonia: Foundation for Landscape Protection;
- Slovacchia: Technical University of Košice;
- Croazia: Institute for the Restoration of Dubrovnik.

OBIETTIVI DEL PROGETTO E WORK PACKAGES

INACO capitalizza il *know-how* sviluppato nei precedenti progetti *Interreg Central Europe*, anch'essi coordinati dal CNR-ISAC: ProteCHTsave (2017-2020) e STRENCH (2020-2022). Le attività previste nel progetto mirano a sviluppare soluzioni e strumenti pratici per supportare le autorità e gli enti competenti nella gestione del rischio, concentrandosi sulle misure di protezione per i siti culturali e naturali. Gli obiettivi chiave sono:

- Definire strategie transnazionali congiunte: migliorare i piani di gestione esistenti rafforzando le capacità delle autorità locali e coinvolgendo i cittadini.
- Sviluppare una piattaforma *WebGIS*: creare una piattaforma integrata per la valutazione del rischio e applicazioni web/mobile per stimare la vulnerabilità dei siti, assistendo gli stakeholder locali. Lo sviluppo utilizzerà modelli climatici regionali e dati dell'osservazione della Terra (programma *Copernicus*) (Bonazza e Sardella, 2023).
- Formare personale specializzato: addestrare il personale a gestire efficacemente le emergenze e a implementare misure proattive di prevenzione e preparazione.

Il progetto è organizzato in tre *Work Packages* (WP) tecnico-scientifici:

- WP1: Rafforzamento della resilienza del patrimonio culturale e naturale. Questo WP valuta l'adozione di direttive e strategie europee sull'adattamento ai cambiamenti climatici a livello regionale e nazionale, identificando punti di forza e debolezza nelle azioni per la salvaguardia dei beni a rischio.
- WP2: Soluzioni per la protezione dei siti. Si concentra sullo sviluppo di applicazioni interattive per la valutazione della vulnerabilità, basate sulla metodologia del progetto STRENCH (Cacciotti *et al.*, 2024). Verrà inoltre integrato il *Risk Mapping Tool for Cultural Heritage Protection* sviluppato nei progetti precedenti con nuove analisi per i siti pilota di INACO (Sardella *et al.*, 2022).
- WP3: Piani di gestione dei rischi. Sulla base dei risultati dei WP precedenti, questo WP mira a integrare le strategie di gestione del rischio nelle politiche nazionali e nella pianificazione urbana, fornendo raccomandazioni per la protezione del patrimonio.

Le attività di INACO sono implementate in otto siti pilota rappresentativi, appartenenti a tre diversi contesti ambientali:

- Aree di transizione marino-fluviale: riserve naturali, borghi storici e giardini come le valli di Comacchio (Delta del Po, Italia) e il fiume di Dubrovnik (Croazia).
- Ambienti lacustri: riserve naturali, edifici storici e siti archeologici situati attorno al Lago di Neusiedl (Austria) e alla città di Fonyód (Lago Balaton, Ungheria).

- Bacini fluviali continentali: complessi monumentali, parchi e giardini nelle Valli di Wiesent e Rednitz (Germania), nella valle di Jeleńnia Gorà (Polonia), nella regione di Košice (Slovacchia) e nella valle del fiume Moldava (Boemia Centrale, Repubblica Ceca).

A luglio 2025 sono terminate le attività relative all'implementazione del WP1, con la preparazione di una strategia transnazionale sviluppata congiuntamente da tutti i partner di progetto per rafforzare la resilienza dei siti del patrimonio culturale e naturale esposti a rischi climatici nei distretti idrografici dell'Europa Centrale, basata su: i) l'individuazione delle lacune ancora esistenti nelle direttive europee sull'acqua e nelle strategie/piani di adattamento ai cambiamenti climatici per quanto riguarda la protezione dei siti culturali e naturali a rischio; ii) l'identificazione dei siti culturali e naturali più sensibili all'impatto di eventi climatici estremi nei distretti idrografici dell'Europa Centrale.

IL PROGETTO PNRR CHANGES

Nell'ambito del progetto PNRR CHANGES le metodologie e gli strumenti accessibili nella piattaforma *Risk Mapping Tool for Cultural Heritage Protection*, sono applicati a due casi studio italiani: il centro storico di Firenze e il paesaggio terrazzato delle isole Eolie.

I due siti sono rappresentativi di differenti categorie di patrimonio culturale, esposti a un diverso rischio idrometeorologico prevalente: complessi monumentali in area urbana a rischio inondazioni e piogge intense nel caso del centro storico di Firenze, esempio di paesaggio terrazzato in area remota costiera a rischio di prolungati periodi siccitosi, piogge intense ed allagamenti nel caso dell'arcipelago Eoliano. Obiettivo prioritario di questa applicazione è definire strategie per mitigare l'impatto dei cambiamenti climatici attraverso la mappatura delle aree a rischio e l'analisi della vulnerabilità.

Le ricerche condotte dal CNR-ISAC hanno previsto prima di tutto l'esecuzione di un percorso conoscitivo dei due siti, corredato da un'approfondita analisi degli eventi estremi che hanno impattato sulle aree in passato, in modo da comprendere a quali rischi idrometeorologici sono stati e potranno essere maggiormente esposti (Canesi *et al.*, 2024).

Nel caso di Firenze, le analisi sugli eventi calamitosi verificatisi in passato, evidenziano come il principale rischio cui l'area è esposta sia quello di alluvione. Particolarmente significativa quella del novembre 1966, in cui l'Arno raggiunse livelli mai visti prima, causando danni all'intera città e al suo patrimonio culturale.

Sulla base delle ricerche svolte, per la realizzazione delle mappe delle proiezioni climatiche a scala territoriale, sono stati selezionati i seguenti indici climatici estremi per indagare la probabilità di aumenti o diminuzioni del rischio di eventi estremi:

- R20mm (*very heavy precipitation days*): numero di giorni in un anno con precipitazioni superiori o uguali a 20mm/giorno;
- Rx5day (*highest 5-days precipitation amount*): massimo annuo di precipitazioni cumulate su periodi consecutivi di 5 giorni;
- R95pTOT (*precipitation due to extreme wet days*): la precipitazione totale in un anno cumulata su tutti i giorni in cui la precipitazione giornaliera è maggiore del 95° percentile della precipitazione giornaliera nei giorni umidi;
- CDD (*maximum number of consecutive dry days*): il numero massimo in un anno di giorni consecutivi di siccità con precipitazioni

giornaliere inferiori a 1 mm/giorno;

- Tx90p (*percentage of extremely warm days*): percentuale di giorni in un anno in cui la temperatura massima giornaliera è maggiore del 90° percentile.

Le mappe per la valutazione del potenziale impatto degli eventi sono visualizzabili e scaricabili con un'elevata risoluzione spaziale di 12x12 km, per due periodi futuri di trent'anni: *near future* (2021-2025) e *far future* (2071-2100), in relazione a due scenari globali (RCP 4.5 e RCP 8.5), secondo modelli di *ensemble* minimo, medio e massimo. Le proiezioni evidenziano un aumento di tutti gli indici, in particolare nel lontano futuro, in relazione allo scenario pessimistico RCP 8.5.

FIGURA 01 – P. 161

L'arcipelago Eoliano è rappresentativo del patrimonio del paesaggio terrazzato in area costiera. La tecnica di costruzione dei muri in pietra a secco caratteristica del paesaggio terrazzato non solo costituisce un'importante memoria storica ma anche una concreta risposta al cambiamento climatico rendendo il territorio più resiliente nei confronti dei rischi idrometeorologici. Infatti, il sistema dei terrazzamenti non ha solo la funzione di circoscrivere il terreno e delimitare le aree coltivabili, ma svolge un ruolo strategico nel contrastare il deflusso delle acque piovane e l'erosione del suolo, poiché favorisce l'infiltrazione garantendo il drenaggio dell'acqua in eccesso (Sardella e Bonazza, 2018).

L'approfondita ricerca sugli eventi che in passato hanno impattato sul sito, anche in questo caso, è stata di fondamentale importanza. Così come nel caso precedente, a fronte del report storico effettuato, sono stati selezionati gli indici (già indicati e descritti in precedenza) per analizzarne le possibili variazioni nel lontano e nel vicino futuro, in entrambi gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5.

FIGURA 02 – P. 162

Le mappe mostrano un aumento della frequenza degli eventi di precipitazioni estreme e della durata dei periodi di siccità, con potenziali conseguenze negative, in particolare nelle aree caratterizzate da abbandono e degrado. Su entrambi i siti pilota, con l'obiettivo di fare una valutazione del rischio, parallelamente alle analisi degli scenari di pericolosità, sarà effettuata la valutazione della vulnerabilità, utilizzando la metodologia sviluppata in precedenza e pubblicata in Cacciotti *et al.* 2024. Verranno selezionate aree definite dei siti per analisi, essendo la metodica applicabile a scala locale. La vulnerabilità, definita come la misura in cui un sistema è esposto a danni derivanti dai cambiamenti climatici, è il risultato dell'interazione di tre fattori: suscettibilità RQ₁, esposizione RQ₂ e resilienza RQ₃ che combinati attraverso un'equazione matematica definiscono un indice V di vulnerabilità; per ogni fattore sono considerati criteri e sotto criteri a cui è assegnato un determinato valore (Cacciotti *et al.*, 2024). Il valore della vulnerabilità calcolato consente di classificare il sito in uno dei seguenti livelli di rischio:

V= 0,0-0,2 molto basso

V= 0,2-0,4 basso

V= 0,4-0,6 moderato

V= 0,6-0,8 alto

V= 0,8-1,0 molto elevato.

Nel sito pilota delle Isole Eolie inoltre le attività di progetto di responsabilità del CNR-ISAC hanno previsto l'installazione di un sistema di acquisizione multiparametrico per il monitoraggio in continuo di parametri climatici (precipitazione, temperatura, umidità relativa, radiazione solare, velocità e direzione del vento) e di inquinamento (PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂) allo scopo principale di colmare, sul territorio oggetto di studio, la lacuna esistente di stazioni di monitoraggio ambientale in situ. L'integrazione dei dati da monitoraggio in situ con quelli ottenibili dai servizi di Copernicus e dalla modellistica climatica sarà fondamentale per una valutazione esaustiva del rischio indotto dai cambiamenti climatici e dell'inquinamento sul patrimonio culturale e della messa a punto di strategie di adattamento e mitigazione appropriate.

FIGURA 03 – P. 163

I risultati di tutte le attività condotte relative ai due siti oggetto di studio nel progetto saranno sintetizzati ed illustrati in schede dove verranno evidenziati il contesto geografico, il patrimonio culturale e naturale presente nell'area, i principali rischi a cui sono esposti, con una documentazione dettagliata sull'analisi dei pericoli, la classificazione delle vulnerabilità e le strategie di mitigazione suggerite. Tali schede verranno integrate nel *Risk Mapping Tool for Cultural Heritage Protection* ed andranno ad aumentare il numero di casi d'uso Europei già presenti.

Riferimenti bibliografici

- Bonazza, A., Sardella, A., Kaiser, A., et al. (2021) 'Safeguarding cultural heritage from climate change related hydrometeorological hazards in Central Europe', in *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol.63. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102455>.
- Bonazza, A., Sardella, A., (2023) 'Climate Change and Cultural Heritage: Methods and Approaches for Damage and Risk Assessment Addressed to a Practical Application', in *Heritage*. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/heritage6040190>.
- Cacciotti, R., Sardella, A., Drdacký, M., et al. (2024) 'A Methodology for Vulnerability Assessment of Cultural Heritage in Extreme Climate Changes' in *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 15, pp. 404-420. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s13753-024-00564-8>.
- Canesi, L., Sardella, A., Vogler, et al. (2024) 'Hazard Analysis and Vulnerability Assessment of Cultural Landscapes Exposed to Climate Change-Related Extreme Events: A Case Study of Wachau (Austria)' in *Heritage*. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/heritage7040091>.
- Direzione Generale per la Sicurezza del Patrimonio Culturale - Ministero della Cultura <http://www.cartadelrischio.beniculturali.it/> (Ultimo accesso: 23 settembre 2025).
- Sardella, A., Palazzi, E., von Hardenberg, J., et al. (2020) 'Risk Mapping for the Sustainable Protection of Cultural Heritage in Extreme Changing Environments', in *Atmosphere*. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/atmos11070700>.
- Sardella, A., Natali, S., Del Grande, C., et al. (2022) 'The Risk Mapping Tool for Cultural Heritage Protection in Europe and Mediterranean Basin' in *Imeko International Conference On Metrology For Archaeology And Cultural Heritage Geosciences For Archaeological Contexts And Cultural Heritage*, Cosenza, pp. 137-142. Disponibile su: <https://www.imeko.org/index.php/proceedings/8693-the-risk-mapping-tool-for-cultural-heritage-protection-in-europe-and-mediterranean-basin> (Ultimo accesso: 23 settembre 2025).
- Sardella, A., Bonazza, A. (2018) 'Dalla lava ai muri in pietra a secco: il paesaggio terrazzato delle isole Eolie' in F. Alberti, A. Dal Pozzo, D. Murtas, M.A. Salas, T. Tillman (a cura di) *Paesaggi terrazzati: scelte per il futuro terzo incontro mondiale*. Venezia: Regione del Veneto, pp. 353-359.
- Risk Mapping Tool for Cultural Heritage Protection (2020). Disponibile su: www.protech2save-wgt.eu (Ultimo accesso: 23 settembre 2025).



FIGURA 01

Centro storico di Firenze.
M. Zevola, 2019.



FIGURA 02

Terrazzamenti nell'isola di Alicudi, Isole Eolie.
A. Sardella, 2025



FIGURA 03

Sistema di monitoraggio meteo-climatico e della qualità dell'aria installato presso l'Osservatorio Geofisico di Lipari, Isole Eolie.

A. Sardella, 2024.

Autori

Massimo Migliorini
Rojin Bayat
Elios De Maio
Jacopo Fiorenza

Affiliazione

Fondazione LINKS
Politecnico di Torino



Le tecnologie immersive, un'opportunità per valorizzare il patrimonio culturale.
M. Migliorini, 2025.

Musei virtuali e metaverso: progettare un'esperienza unificata tra ambienti VR e avatar intelligenti

Lo studio presenta un'analisi estesa del progetto “Musei nel Metaverso”, sviluppato da Fondazione LINKS con Palazzo Madama nel quadro del progetto europeo CTE-NEXT. Muovendo dallo stato dell'arte sui musei virtuali e sull'impiego di avatar intelligenti, il lavoro descrive nel dettaglio un percorso integrato composto da un ambiente metaverso (Piazza Memorabilia) e da un laboratorio in Realtà Virtuale per insegnare le tecniche antiche di realizzazione delle medaglie rinascimentali. La componente di intelligenza artificiale, incarnata nell'avatar Virgilio che guida l'esperienza del laboratorio, abilita un'interazione naturale voce-testo-voce. La sperimentazione con studenti e l'evento finale aperto al pubblico hanno offerto spunti per discutere efficacia didattica, replicabilità, interoperabilità e sostenibilità. Il paper propone infine una riflessione sulle prospettive di scalabilità nel contesto europeo, alla luce della diffusione del 5G e delle iniziative Horizon Europe. Negli ultimi vent'anni il rapporto tra patrimonio culturale e tecnologie digitali ha conosciuto una trasformazione profonda. Dalle prime collezioni fotografiche online e dai tour 2D si è passati a ricostruzioni tridimensionali navigabili e, più di recente, ad esperienze immersive in realtà virtuale e ambienti metaverso. La letteratura ha letto questo passaggio come un'evoluzione del concetto di “museo virtuale”: non più soltanto copia digitale di spazi e oggetti, ma ecosistema in cui la narrazione e l'interazione diventano parte costitutiva della fruizione (Mase *et al.*, 2000). In tale cornice, il focus si sposta dal “cosa mostrare” al “come far vivere” i contenuti, con una rinnovata attenzione al design dell'esperienza.

Falk e Dierking hanno proposto un modello esperienziale che intreccia tre dimensioni – personale, situazionale e mnemonica – suggerendo ai musei di progettare percorsi che parlino agli interessi del visitatore, al contesto di visita e alla costruzione di ricordi (Falk e Dierking, 2013). Le tecnologie immersive agiscono trasversalmente su questi livelli: aumentano la presenza e il senso di *agency* (ovvero sensazione di essere l'autore delle proprie azioni e di avere controllo sugli effetti che producono nel mondo), favoriscono forme di apprendimento esperienziale e stimolano la rielaborazione post-visita. La *gamification*, quando impiegata con criteri pedagogici, introduce obiettivi, *feedback* e sfide che accrescono la motivazione intrinseca e la memorabilità dei contenuti (Chang, 2006).

Accanto a queste riflessioni, si colloca l'integrazione degli avatar intelligenti. Se i primi *guide-bot* si limitavano a risposte chiuse e poco articolate, i modelli linguistici di grandi dimensioni consentono conversazioni aperte, contestuali e multimodali. In ambito museale, la possibilità di coniugare riconoscimento vocale, generazione linguistica e sintesi vocale apre scenari inediti di mediazione culturale, con guide virtuali capaci di adattarsi al livello

di conoscenza, alla lingua e all'interesse del visitatore (Trichopoulos *et al.*, 2023). Sul piano europeo, programmi come *Horizon Europe* spingono verso esperienze interoperabili, accessibili e misurabili, in cui l'uso del 5G consenta latenza ridotta e servizi *cutting-edge* per contenuti ad alta intensità grafica. Il quadro internazionale offre esempi utili per il confronto: dai tour virtuali del Louvre e del Prado alle esperienze VR del British Museum e dello Smithsonian, fino alle sperimentazioni di musei nordici su ricostruzioni storiche in WebXR. Questi casi mostrano come la qualità non sia legata alla mera fedeltà fotorealistica, quanto alla chiarezza del racconto, alla calibrazione del carico cognitivo e alla possibilità di interagire con gli oggetti in chiave investigativa. Resta centrale il tema dell'accessibilità: interfacce contraddistinte da affordance chiare, sottotitoli e descrizioni audio, modalità comfort per ridurre il *motion sickness* (senso di vertigine che genera il visore in Realtà Virtuale) e percorsi *low-vision friendly* sono elementi che incidono sull'inclusione almeno quanto il contenuto.

A livello metodologico, il progetto si inserisce nelle pratiche di *co-design* e *design thinking* applicate ai beni culturali: ascolto degli stakeholder, prototipazione rapida, test iterativi con utenti, misurazione e affinamento. Questo approccio evita l'innovazione "a sportello" e favorisce l'allineamento tra obiettivi educativi, scelte tecnologiche e sostenibilità operativa, condizione necessaria per un impatto reale e duraturo.

IL PROGETTO MUSEI NEL METAVERSO

Il *Proof of Concept* "Musei nel Metaverso" nasce nel contesto di CTE-NEXT, progetto europeo volto a realizzare a Torino un centro diffuso di trasferimento tecnologico sulle tecnologie emergenti collegate al 5G, con verticali su *Smart Road*, *Urban Air Mobility*, Industria 4.0 e Servizi Urbani Innovativi e PA (CTE-NEXT, 2023). Nel verticale dedicato ai servizi urbani la collaborazione tra Fondazione LINKS e Palazzo Madama ha consentito di esplorare l'uso di VR e metaverso come servizio culturale rivolto a scuole e cittadini.

FIGURA 01 – P. 170

La scelta del medagliere rinascimentale di Palazzo Madama ha risposto all'esigenza di valorizzare una collezione tanto preziosa quanto poco esposta. Le medaglie, a partire dall'invenzione di Pisanello, sono state strumento di celebrazione e di comunicazione politica, diffondendosi nelle corti italiane ed europee tra Quattro e Cinquecento. La loro trasposizione digitale non si è limitata alla riproduzione dell'oggetto, ma ha puntato a rendere comprensibile – attraverso un laboratorio simulato – l'intera filiera artigianale della fusione a cera persa (Seghesio, 2021).

L'esperienza VR sviluppata si articola in due ambienti integrati: Piazza Memorabilia, e il Laboratorio VR.

Piazza Memorabilia, realizzata in ambiente metaverso *Spatial*, utilizza una sala del museo come innesco narrativo per proiettare l'utente in una piazza rinascimentale ideale, dove il ritrovamento di cinque medaglie attiva altrettante micro-narrazioni.

FIGURA 02 – P. 171

Il laboratorio VR, realizzato integralmente in ambiente di realtà virtuale, guida l'utente nella creazione di una medaglia personale: dal bozzetto all'incisione, dalla fusione alla rifinitura. La continuità tra i due ambienti è garantita da uno stile visivo condiviso e dalla presenza costante dell'avatar

Virgilio. L'utente impiega le proprie mani (senza uso di *controller*) per apprendere la tecnica della cera persa, antica tecnica di creazione delle medaglie usata nel periodo rinascimentale, e arriva a produrre una propria medaglia personalizzata.

FIGURA 03 – P. 172 FIGURA 04 – P. 172

Dal punto di vista tecnico, la *pipeline* di produzione degli ambienti metaverso e VR ha adottato *Unity* con URP per bilanciare resa e performance su dispositivi *standalone*. I modelli 3D sono stati realizzati in *Blender* con retopologia e LOD, texture compattate in atlanti, luci prevalentemente *bake* per ridurre i costi in tempo reale, *occlusion culling* e *batching* per limitare le *draw call*. Il sistema di interazione sfrutta l'*Oculus SDK* per *hand tracking* e *gesture*, mentre la locomozione privilegia il teletrasporto con rotazioni incrementali e vignettatura adattiva per contenere la chinetosi. Per l'integrazione con *Spatial* sono stati utilizzati SDK e *prefabs* proprietari; limitazioni di fisica e *scripting* sono state mitigate con pre-calcoli e asset leggeri. L'esperienza viene accompagnata da Virgilio, un avatar 3D animato dall'intelligenza artificiale che svolge il ruolo di guida conversazionale multimodale. La *pipeline* voce-testo-voce utilizza *Whisper* per lo *speech-to-text*, un buffer contestuale per mantenere coerenza e memoria breve, GPT-4 per la generazione delle risposte e *ElevenLabs* per la restituzione vocale. L'addestramento *in-context* comprende schede sintetiche sul medagliere, un glossario tecnico e prompt di ruolo per stabilizzare tono e registro. Sono stati adottati filtri lessicali e politiche conservative sui log delle conversazioni, in coerenza con il trattamento di dati di minori e con le prassi GDPR. La *pipeline* di *authoring* dei contenuti ha incluso passaggi specifici per garantire qualità e rigore: mappatura del corpus e selezione delle medaglie prioritarie; redazione delle micro-narrazioni con revisione curatoriale; definizione degli *storyboard*; modellazione e *texturing* con controlli di coerenza storica; validazione linguistica e vocale dell'avatar; test di usabilità con prototipi a bassa fedeltà, quindi con build incrementali. Ogni ciclo di test ha prodotto piccole correzioni: semplificazione dei comandi, inserimento di segnali visivi, calibrazione dei tempi di spiegazione, miglioramento della leggibilità tipografica in VR.

Un aspetto rilevante ha riguardato l'UX inclusiva. Sono state previste alternative ai comandi gestuali, sottotitoli attivabili, istruzioni contestuali e ritmi di azione non pressanti. La progettazione ha adottato una logica "diegetica", integrando elementi di interfaccia nell'ambiente (cartigli, strumenti, tavole) per ridurre la distanza tra compito e contesto. La sicurezza dei dati vocali è stata affrontata con anonimizzazione dei log, retention limitata e controlli sul linguaggio dell'avatar per prevenire risposte inappropriate. Per la componente in *Unity* è stata adottata la *Universal Render Pipeline* con impostazioni conservative: render scale compresa tra 0.9 e 1.0 per mantenere nitidezza su *Meta Quest 2*, MSAA a 2x per limitare *aliasing* e costi GPU, *lightmapping* con *Progressive GPU* e mix di *baked* e *mixed lights* per preservare ombre credibili in aree chiave. I modelli delle architetture della piazza rinascimentale sono stati retopologizzati per rimanere i modelli entro 80-120k triangoli per la scena visibile. Le texture sono state raggruppate in atlanti 2K per le facciate e 1K per *props* e strumenti, privilegiando *normal map* e *occlusion map* leggere; dove possibile si è ricorso a *trim sheet* per ripetere pattern architettonici senza moltiplicare materiali. Gli *shader URP Lit* sono stati personalizzati disattivando *features* non necessarie (*clear coat*, *translucency*), mentre per oggetti minori si è optato per *Simple Lit* senza *normal map*. Il numero di materiali per oggetto è stato contenuto a 1-2 per ridurre

le *draw call*; *batching statico* e *GPU instancing* sono stati abilitati e verificati con *Frame Debugger*. La locomozione ha utilizzato *teleport* con *fade* e *snap turn* a 30°; i *collider* sono stati ottimizzati con primitive ove possibile; il *NavMesh* è stato impiegato solo per gli NPC con agenti leggeri. Per l'*hand tracking* si è mantenuto un compromesso tra reattività e stabilità dei gesti: soglie di *pinch* e *grab* tarate su utenti inesperti, feedback visivi (*highlight*, *outline*) e sonori diegetici (colpi di martello attenuati in base alla distanza) per segnalare azioni corrette.

La *pipeline* dell'avatar ha introdotto *Voice Activity Detection* per evitare invii spurii a *Whisper* e un *micro-buffer* di 1–2 secondi per comporre enunciati completi; *prompt* di sistema con persona storicamente neutra, stile divulgativo e istruzioni di brevità quando l'utente richiede aiuto operativo; per domande storiche, Virgilio propone sintetiche contestualizzazioni con inviti alla verifica presso pannelli informativi in-scene. Per l'integrazione con *Spatial* si è optato per scene a complessità controllata, sfruttando gli strumenti di *moderation* e l'*avatar system* nativo per il *multiplayer* asincrono; i test di latenza con 5G hanno evidenziato *round-trip* medi inferiori ai 200 ms per lo scambio testuale, ma con variabilità legata alla copertura *indoor*. Sul fronte valutativo, è stato predisposto un set di indicatori: tempo di *onboarding* (primo minuto), numero di richieste di aiuto all'avatar, tassi di completamento delle fasi del laboratorio, auto-valutazione di comprensione e interesse su scala *Likert*, osservazioni etnografiche dei facilitatori.

Tra il 22 e il 24 maggio 2024, il POC è stato sperimentato con oltre sessanta studenti, che hanno potuto visitare Piazza Memorabilia, apprendere la tecnica della cera persa e realizzare una versione virtuale della propria medaglia. Successivamente, la sperimentazione ha visto un contest e la premiazione delle medaglie più belle, che sono state esposte a Palazzo Madama durante la mostra reale delle medaglie rinascimentali, stimolando gli studenti a visitarla grazie al senso di appartenenza e co-progettazione generato.

FIGURA 05 – P. 173

La sequenza “orientamento–esplorazione–laboratorio–*debriefing*” ha favorito la presa di confidenza con i visori e ha reso più fluidi i passaggi di consegne tra gruppi. Le osservazioni raccolte indicano che la possibilità di “toccare” virtualmente gli strumenti e di vedere gli effetti delle azioni facilita la comprensione di concetti astratti; i minuti iniziali restano i più delicati, ma l'avatar aiuta a superare l'impasse. L'evento finale del 2 dicembre 2024, che ha visto la Premiazione ufficiale con la partecipazione dell'Assessore alla Cultura di Torino e di altre realtà locali di rilievo nel contesto storico-culturale, ha restituito pubblicamente il lavoro con stampe 3D delle medaglie più riuscite ed esposizione nella Torre Tesori, suggellando il dialogo tra collezione storica e produzione contemporanea.

DISCUSSIONE E PROSPETTIVE

L'esperienza conferma che l'apprendimento in VR è più efficace quando la dimensione pratica è agganciata a una narrazione chiara e a obiettivi espliciti. Il progetto ha mostrato benefici in termini di motivazione e memorizzazione procedurale, ma per consolidare l'impatto sono necessari protocolli valutativi più robusti (test pre/post, follow-up), coerenti con i *framework* museologici europei. La replicabilità dipende dalla modularità dei contenuti e dalla possibilità di aggiornare asset e narrazioni senza ricostruire l'intera esperienza.

Dal punto di vista tecnico, l'adozione di standard aperti (glTF per i modelli,

WebVTT per i sottotitoli) e di architetture a servizi favorisce portabilità e longevità. Un'evoluzione prevista è l'integrazione di *retrieval-augmented generation* per ancorare l'avatar a basi di conoscenza validate, con citazioni contestuali e link di approfondimento, e la sperimentazione di funzionalità *multiplayer* cooperative per attività didattiche sincrone. In presenza di 5G affidabile, si aprono scenari di *edge rendering/CloudXR* per ambienti più complessi senza sacrificare la qualità visiva.

Sul piano organizzativo, l'adozione su larga scala richiede modelli di governance e business sostenibili. Una possibile traiettoria è quella di pacchetti "*XR as a Service*" che combinino licenze d'uso, formazione del personale, supporto tecnico, aggiornamenti contenutistici e misurazione d'impatto. La costruzione di profili professionali come *XR curator* ed *educator* e la creazione di reti con scuole e università potranno certamente essere ulteriori condizioni abilitanti.

Infine, accessibilità ed etica non sono accessori ma prerequisiti: comfort configurabile, alternative testuali e vocali, localizzazione multilingue, attenzione a vulnerabilità e *bias* degli LLM, regole trasparenti sul trattamento dei dati. Il quadro europeo offre un contesto favorevole per consolidare queste pratiche e spingerle verso standard condivisi.

"Musei nel Metaverso" suggerisce una via per trasformare la valorizzazione in esperienza viva e partecipata. La combinazione di metaverso, laboratorio VR e avatar conversazionale ha reso accessibile un patrimonio poco visibile, con effetti positivi su motivazione e comprensione. Per scalare occorrono contenuti modulari, infrastrutture affidabili a bassa latenza, standard aperti e investimenti in competenze. Una possibile *roadmap* futura include: a) introduzione di RAG con schede curate dal museo e citazioni dinamiche b) estensione *multiplayer* cooperativa con ruoli (fonditore, incisore, storico) e obiettivi condivisi; c) sperimentazione di *edge rendering/CloudXR* in presenza di 5G stabile; d) pacchetti di localizzazione con *switch in-app* di voce e testo; e) pubblicazione di linee guida di accessibilità XR basate sull'esperienza maturata (comfort presets, alternative input, sottotitoli, dimensioni minime dei testi, contrasto). Questi accorgimenti tecnici e metodologici potranno aiutare a scalare l'esperienza preservando qualità, inclusione e sostenibilità, con l'obiettivo finale di generare un ecosistema culturale digitale più connesso e sostenibile.

Riferimenti bibliografici

- Chang, E. (2006) 'Interactive experiences and contextual learning in museums', in *Studies in Art Education*, 47(2), pp.170-186.
- Chung, S.J., Kim, S.Y., Kim, K.H. (2024) 'Comparison of visitor experiences of virtual reality exhibitions by spatial environment' in *International Journal of Human-Computer Studies*, 181, p. 103145. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103145>.
- CTE-NEXT (2023) *Progetto europeo CTE-NEXT: documentazione ufficiale*. Torino City Lab. Disponibile su: <https://ctenext.it/it-progetto/>.
- Falk, J.H., Dierking, L.D. (2013) *The Museum Experience Revisited*. Walnut Creek: Left Coast Press.
- Mase, K., Kadobayashi, R., Nakatsu, R. (2000) 'Meta-museum: A supportive augmented-reality environment for knowledge sharing', in *Proceedings of the International Conference on Multimedia*, pp. 431-439.
- Seghesio, C. (2021) 'Il medagliere rinascimentale di Palazzo Madama', in *Rivista di Palazzo Madama*.
- Trichopoulos, G., Konstantakis, M., Caridakis, G. et al. (2023) 'Crafting a museum guide using ChatGPT-4', in *Big Data and Cognitive Computing*, 7(3), p. 148. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/bdcc7030148>.

Note

- 1 Esperienze pensate per persone con ipovisione che aumentano l'accessibilità attraverso l'uso di contrasti cromatici forti (testi chiari su sfondo scuro o viceversa, evitando sfondi elaborati che confondono), caratteri tipografici grandi e leggibili, elementi visivi semplificati che non costringano a districarsi in un labirinto di dettagli troppo intricati, guide vocali e descrizioni audio che accompagnano e orchestrano l'esperienza.



FIGURA 01

Musei nel Metaverso.
Riferimento visivo per Medaglia Rinascimentale.
M. Migliorini, 2025.



FIGURA 02

Musei nel Metaverso.
Piazza Memorabilia.
M. Migliorini, 2025.

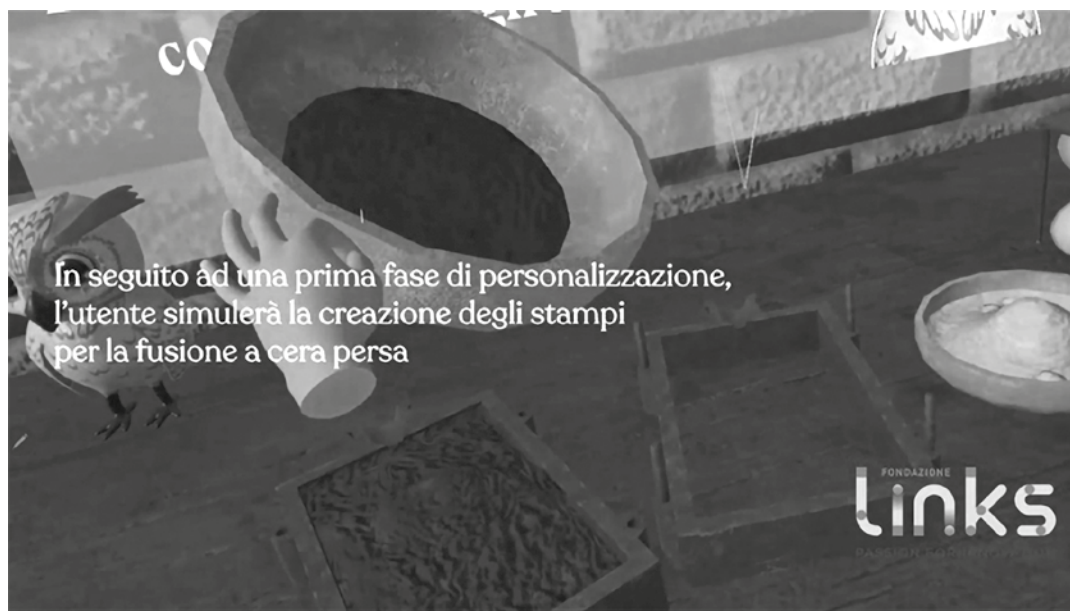


FIGURA 03

Musei nel Metaverso.
Screenshot del Laboratorio VR – sala dell'impasto.
M. Migliorini, 2025.



FIGURA 04

Musei nel Metaverso.
Laboratorio VR – Personalizzazione delle Medaglie.
M. Migliorini, 2025.



FIGURA 05

Musei nel Metaverso.
Evento divulgativo a Barcellona.
M. Migliorini, 2025.

Autori	Luca Pezzati Franco Niccolucci
Affiliazione	Istituto Nazionale di Ottica del CNR, CNR-INO Fondazione PIN



Palazzo Vecchio a Firenze e il suo digital twin.
Elaborazione di F. Nicolucci, 2025.

Il Progetto ARTEMIS e il Reactive Heritage Digital Twin

Il concetto di gemello digitale (*Digital Twin*, DT), inizialmente sviluppato in contesti industriali per replicare digitalmente oggetti e processi fisici, ha trovato applicazione nel campo del patrimonio culturale con l'obiettivo di gestire, conservare e valorizzare beni culturali attraverso tecnologie digitali. Anche se il *Digital Twin* è definito come la replica digitale di un oggetto nel mondo reale che scambia interattivamente informazioni con il suo corrispondente, in molte applicazioni nel campo dei Beni Culturali il termine è stato impropriamente usato come sinonimo di un semplice modello 3D, più propriamente definito una replica digitale (Wagg *et al.*, 2025; Jones *et al.*, 2020). Questa visione limitata è stata in parte superata con il concetto di *Heritage Digital Twin* (HDT), un approccio che considera il gemello digitale come la somma delle rappresentazioni digitali di un bene culturale – siano esse modelli 3D, dati storici, documentazione fotografica, informazioni ambientali o archivistiche, analisi scientifiche sull'oggetto – strutturate in un sistema coerente e consultabile (Niccolucci *et al.*, 2022). Sebbene l'HDT rappresenti un'evoluzione importante, esso resta un modello statico: le informazioni devono essere aggiornate manualmente non essendovi interattività fra mondo virtuale e mondo reale. L'HDT prende inoltre in considerazione anche la componente immateriale del patrimonio, che di ogni bene culturale è una componente essenziale. Per rispondere a queste esigenze, il progetto ARTEMIS introduce il concetto di *Reactive Heritage Digital Twin* (RHDT), un modello dinamico e adattivo che estende l'HDT dotandolo di capacità predittive e reattive (Niccolucci e Felicetti, 2025a). Il RHDT è quindi un ecosistema digitale che integra in tempo reale dati provenienti da sensori fisici (es. temperatura, vibrazione, umidità), logici (es. sistemi meteo o previsioni ambientali), attuatori automatici e software di simulazione. L'obiettivo è simulare e prevedere l'evoluzione di un bene ed essere in grado – se desiderato – di produrre reazioni automatiche ad eventi nel mondo reale, sia causati da umani o da eventi naturali. L'*Internet of Cultural Things* (IoCT) è il concetto base su cui si basa il RHDT. Si tratta di un'estensione culturale del concetto di *Internet of Things* (IoT), che consiste in una rete di dispositivi connessi – sensori, attuatori, nodi di elaborazione – specificamente applicata al monitoraggio e alla gestione dei beni culturali. Questa rete consente l'acquisizione automatica e continua di dati relativi alle condizioni ambientali, strutturali o sociali in cui si trova un bene. Tali dati vengono analizzati dal modello e possono determinare reazioni – automatiche o guidate da operatore – nel mondo reale, anche attraverso specifici attuatori. I dati raccolti vengono elaborati dal sistema, che può generare allarmi, proporre interventi, simulare scenari e, in alcuni casi, attivare direttamente contromisure. Nell'ottica di ARTEMIS, il RHDT può così essere anche utilizzato per le simulazioni degli effetti di azioni o eventi, in particolare per simulare virtualmente il restauro o valutare l'impatto di eventi naturali.

La portata di questa innovazione è ampia: ad esempio, un sistema RHDT può impedire automaticamente l'accesso a una sala museale se rileva valori critici di umidità, oppure simulare l'effetto di un restauro prima ancora che venga eseguito. Gli interventi possono quindi essere valutati in ambienti virtuali. ARTEMIS suddivide l'analisi e l'applicazione dei digital twin reattivi in quattro scale operative:

1. Scala micro: riguarda oggetti di piccole dimensioni, come reperti archeologici, statue, dipinti. Le simulazioni possono riguardare l'azione di agenti atmosferici, parassiti, variazioni termiche e l'interazione con l'ambiente circostante. Un esempio concerne il monitoraggio di un'opera d'arte come il pulpito di Giovanni Pisano nella chiesa di sant'Andrea a Pistoia (Marafini *et al.*, 2024). Per monitorarne continuamente lo stato, si è installato un complesso sistema di sensori che registrano le variazioni ambientali quali l'umidità ambientale e micro-spostamenti. I dati vengono registrati e raccolti periodicamente da specialisti che li analizzano e se necessario attuano interventi conservativi. L'uso di un RHDT potrebbe automatizzare questa operazione ed operare sull'ambiente circostante, ad esempio facilitando la circolazione dell'aria, oppure trasmettendo immediatamente ai conservatori allarmi per situazioni di rischio (Niccolucci e Felicetti, 2025a).

FIGURA 01 – P. 180

2. Scala media: applicata a edifici storici o monumenti complessi. Gli interventi includono manutenzione ordinaria e straordinaria quando necessaria, valutazioni strutturali, prevenzione dei danni sismici, gestione della stabilità degli edifici ma anche di loro importanti componenti. Si potrebbe citare come esempio il Battistero di Firenze e il restauro dei suoi mosaici.

FIGURA 02 – P. 181

3. Scala macro: coinvolge paesaggi culturali, città storiche, siti archeologici estesi. Qui entrano in gioco fenomeni come il cambiamento climatico, l'urbanizzazione, la pressione turistica. Venezia è il riferimento che balza subito alla mente.

FIGURA 03 – P. 182

4. Scala intangibile: considera impatti culturali, sociali ed emotivi: cambiamenti nella percezione, fruizione e valore attribuito ai beni da parte delle comunità. Ad esempio, la Basilica di S. Croce a Firenze oltre ad essere un edificio religioso di grande importanza architettonica è anche un "luogo della memoria" per la presenza dei sepolcri – citati da poeti e scrittori – di uomini illustri. Questa caratteristica va tenuta in conto per considerare il valore culturale della Basilica (Niccolucci e Felicetti, 2025b).

FIGURA 04 – P. 183

La gestione di questa mole di dati e delle loro relazioni richiede una struttura semantica robusta: l'ontologia RHDTO (*Reactive Heritage Digital Twin Ontology*) basata su RHDT (Niccolucci e Felicetti, 2025a). Questa ontologia definisce classi e proprietà che descrivono luoghi, oggetti, eventi, soggetti agenti, modelli digitali, relazioni temporali e causali. Ciò garantisce una rappresentazione formale del sapere che può essere interrogata, condivisa e utilizzata da software diversi, contribuendo alla piena interoperabilità semantica del

sistema. RHDTO include classi per oggetti fisici, luoghi, eventi, modelli 3D, e così via. Si tratta di un'estensione compatibile (un cosiddetto *application profile*) con lo standard internazionale di classificazione dei beni culturali ISO 21127:2023, noto anche come CIDOC CRM, che quindi permette l'integrazione nel sistema di archivi di dati organizzati secondo questo standard di applicazione pressoché universale nel mondo dei beni culturali.

Oltre alla gestione reattiva della combinazione *digital twin* – mondo reale, ARTEMIS sviluppa la visualizzazione immersiva e interattiva attraverso tecnologie AR (*Augmented Reality*), VR (*Virtual Reality*) ed XR (*Extended Reality*) degli eventi previsti o simulati dal sistema. Per esempio, si potranno mostrare gli effetti di un evento naturale come un'inondazione oppure valutare il risultato di un restauro prima di eseguirlo materialmente. La novità risiede nell'introduzione della *Scientific Virtual Reality* (SVR), un paradigma che trasforma gli ambienti immersivi in laboratori virtuali dove testare ipotesi, eseguire restauri simulati, visualizzare flussi di dati e condividere annotazioni tra ricercatori.

Infine, il sistema ARTEMIS prevede un set di servizi digitali integrati:

- Servizi IoCT: attivazione automatica di risposte a eventi rilevati dai sensori.
- Servizi *cloud-native*: archiviazione e processamento remoto dei dati, accessibili da qualunque luogo.
- Servizi di simulazione: riproduzione digitale di fenomeni fisici, come instabilità strutturale, erosione, degrado, e simulazione degli effetti di interventi di restauro.
- Servizi XR: generazione di esperienze immersive, manipolazione virtuale degli oggetti, in prospettiva (anche se non sviluppata nel progetto) storytelling interattivo.

Un valore aggiunto di ARTEMIS risiede nella sua capacità di integrare conoscenze multidisciplinari in un'unica piattaforma. Storici dell'arte, restauratori, ingegneri, informatici, archeologi, climatologi collaborano per trasformare modelli teorici in strumenti computazionali. Questa transdisciplinarietà si riflette nelle simulazioni, che non solo riproducono l'evoluzione fisica dei beni, ma tengono conto anche dei contesti sociali, ambientali e storici. Un esempio concreto di applicazione è la prevenzione del rischio idrogeologico nei centri storici: collegando i dati meteo alle simulazioni di flusso idrico, il sistema può prevedere le zone soggette ad allagamenti e allertare i responsabili dei beni. Allo stesso modo, in caso di terremoti, il RHDTO può simulare in anticipo quali strutture sono più vulnerabili e suggerire interventi di rafforzamento prima dell'evento. L'obiettivo a lungo termine è creare un ecosistema europeo di RHDTO interoperabili, ciascuno riferito a un bene culturale ma collegato a una rete più ampia, condividendo informazioni e strategie. Questo approccio rafforza la resilienza del patrimonio europeo di fronte a sfide complesse e sistemiche. Un aspetto fondamentale della proposta ARTEMIS è la capacità di trasformare software specializzati e strumenti scientifici esistenti in servizi *cloud-based* integrabili nel sistema RHDTO. Molti strumenti utilizzati attualmente dagli specialisti del patrimonio (per esempio software di calcolo strutturale, di analisi ambientale o di simulazione dei materiali) operano come applicazioni stand-alone, accessibili solo da utenti esperti e spesso non interconnessi con basi di dati culturali. ARTEMIS mira invece a integrare tali applicazioni in un sistema integrato che si appoggia e contribuisce a una base di dati continuamente aggiornata. Il vantaggio di un approccio *cloud-native* è duplice: da un lato consente un'elaborazione potente e distribuita di grandi moli di dati (ad esempio, simulazioni strutturali complesse su edifici storici), dall'altro offre un accesso semplice e scalabile

anche a piccoli enti o musei con risorse limitate. Il modello di servizio consente quindi di democratizzare l'accesso alla tecnologia avanzata, favorendo una gestione più ampia e diffusa del patrimonio.

In parallelo, ARTEMIS introduce anche un sistema per la documentazione continua e dinamica delle attività di restauro. Ogni intervento, simulazione, osservazione, analisi scientifica o misura è associato al gemello digitale del bene e archiviato nel sistema. In questo modo si costruisce una “memoria digitale evolutiva” che non solo conserva la storia del bene, ma registra anche tutte le decisioni, i tentativi, i successi e le problematiche affrontate durante il tempo. Questa memoria digitale non è soltanto un archivio, ma uno strumento operativo: i dati precedenti possono essere riutilizzati per future valutazioni, comparazioni, ricerche o restauri. Il sistema diventa quindi un laboratorio scientifico permanente, dove ogni dato ha valore cumulativo, e dove la conoscenza si sedimenta, cresce e si perfeziona.

Per le istituzioni museali, ARTEMIS offre strumenti per ampliare l'accessibilità e la fruizione: le esperienze virtuali possono essere rese disponibili online, superando le barriere fisiche, economiche o cognitive. Persone con disabilità, scuole in aree remote, comunità con accesso limitato potranno accedere al patrimonio culturale in modi innovativi, rafforzando il concetto di patrimonio condiviso e partecipato. Dal punto di vista tecnico, il sistema è progettato per essere modulare, estensibile e aperto. Utilizza standard semantici, protocolli aperti e interfacce API per garantire che possa integrarsi con altri progetti, piattaforme e archivi. Questo favorisce la creazione di un ecosistema europeo di interoperabilità, in linea con le iniziative della *European Open Science Cloud* (EOSC) e dei programmi di ricerca europei.

Infine, ARTEMIS ha un forte potenziale in termini di sostenibilità ambientale. Le simulazioni digitali riducono la necessità di spostamenti, esperimenti fisici distruttivi o interventi a rischio. In una logica di economia circolare, il progetto mira a ottimizzare le risorse, prevenire i danni prima che accadano e orientare le politiche pubbliche verso la conservazione preventiva, la gestione predittiva e l'*empowerment* digitale.

Un altro tema di rilievo nel contesto ARTEMIS è l'etica digitale applicata al patrimonio. L'introduzione di simulazioni e visualizzazioni può alterare la percezione di autenticità, rendendo necessario stabilire regole chiare sulla rappresentazione virtuale di opere d'arte e monumenti. Per questo, ARTEMIS si propone di estendere i principi della Carta di Londra (linee guida per la rappresentazione 3D del patrimonio culturale) includendo criteri di trasparenza scientifica, tracciabilità delle fonti, qualità scientifica dei contenuti. ARTEMIS promuove inoltre la partecipazione delle comunità locali, riconoscendo il valore delle conoscenze tradizionali, delle memorie collettive e delle pratiche sociali legate al patrimonio. La piattaforma RHDT potrà integrare dati etnografici, testimonianze orali e narrazioni locali, creando una rappresentazione polifonica del bene culturale che rispetti la pluralità dei punti di vista e valorizzi le culture locali.

A livello strategico, il progetto si colloca in sintonia con le politiche europee sulla digitalizzazione e la valorizzazione del patrimonio, come il *New European Bauhaus*, la *Digital Europe Programme* e il *Green Deal* europeo. In particolare, ARTEMIS contribuisce agli obiettivi di sostenibilità, inclusione e innovazione promossi a livello continentale, offrendo una piattaforma di riferimento per i progetti culturali del futuro. Il potenziale futuro del progetto include l'integrazione con tecnologie emergenti come intelligenza artificiale, *blockchain* e *edge computing*. Sono già in corso nel progetto esperimenti con applicazioni di intelligenza artificiale sia per aumentare la quantità e qualità dei dati raccolti che per riconoscere pattern nei dati storici e prevedere effetti di degrado non ancora rilevabili visivamente. La *blockchain* potrà garantire la tracciabilità delle modifiche e delle

decisioni prese sul bene, mentre l'*edge computing* potrà permettere elaborazioni locali anche in siti remoti o scarsamente connessi.

In prospettiva, l'approccio di ARTEMIS potrà estendersi a nuovi domini del patrimonio, inclusi archivi, biblioteche, documenti storici e espressioni di patrimonio immateriale come musica, pratiche e riti tradizionali. La metodologia proposta è infatti flessibile e adattabile a diversi contesti, purché supportata da una base dati strutturata e da una comunità scientifica competente.

In conclusione, ARTEMIS propone un nuovo paradigma per la gestione del patrimonio culturale: da statico a dinamico, da descrittivo a predittivo, da isolato a interconnesso. Il *Reactive Heritage Digital Twin* rappresenta una vera rivoluzione digitale nel modo in cui comprendiamo, proteggiamo e valorizziamo i beni culturali. Superando le limitazioni dei modelli statici, ARTEMIS offre una piattaforma integrata, reattiva, scientificamente fondata e tecnologicamente avanzata, in grado di affrontare le sfide del nostro tempo: cambiamenti climatici, rischi naturali, digitalizzazione, valorizzazione e accesso universale alla cultura. Attraverso la creazione dei *Reactive Heritage Digital Twin*, ARTEMIS consente non solo di documentare, ma anche di prevedere, simulare, visualizzare e decidere in modo informato e consapevole. È un sistema che evolve con il bene culturale, che cresce con la conoscenza scientifica, che dialoga con i professionisti e che si apre ai cittadini.

Nel corso della sua implementazione, ARTEMIS dimostrerà come le tecnologie più avanzate – se guidate da valori umanistici, scientifici e partecipativi – possano contribuire a salvaguardare il passato per costruire il futuro. Il patrimonio culturale europeo, nella sua ricchezza e diversità, potrà così contare su strumenti più intelligenti, sostenibili e inclusivi per affrontare le sfide della conservazione, della valorizzazione e della trasmissione alle generazioni future.

In un'epoca segnata dalla trasformazione digitale, ARTEMIS è la risposta a una domanda urgente: come possiamo usare la tecnologia non per sostituire il nostro patrimonio, ma per capirlo meglio, proteggerlo con maggiore efficacia, e dividerlo con più persone, in più luoghi, in più modi? La risposta è nel gemello digitale reattivo: un laboratorio, un archivio, una simulazione, una finestra aperta sulla storia – in tempo reale.

L'adozione del RHDT come paradigma operativo permanente potrà influenzare anche le politiche culturali e urbane. Esso rappresenta un passaggio da una logica centrata sulla conservazione episodica a una gestione integrata e permanente, alimentata dalla conoscenza scientifica e da sistemi intelligenti di supporto alle decisioni. Le simulazioni potranno essere integrate nei processi di pianificazione urbana, nella gestione dei flussi turistici, nella protezione del paesaggio e nella valorizzazione delle tradizioni locali.

In sintesi, ARTEMIS è molto più di un'infrastruttura tecnologica: è un programma di rinnovamento culturale. Incorpora visione, metodo e strumenti per trasformare radicalmente il modo in cui interagiamo con la nostra eredità storica. La combinazione tra simulazione, reattività, intelligenza semantica e realtà virtuale costituisce un'opportunità unica per traghettare il patrimonio europeo nel futuro, assicurandone la tutela, la comprensione e la trasmissione.

Riferimenti bibliografici

- Wagg, C., Niederer, S., Burr, C., et al. (2025) 'The philosophical foundations of digital twinning', in *Data-Centric Engineering*, vol.6, e12. Disponibile su: <https://doi.org/10.1017/dce.2025.4>.
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., et al. (2020) 'Characterising the Digital Twin: A systematic literature review', in *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, 29, pp. 36-52. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- Nicolucci, F., Felicetti, A., Hermon, S. (2022) 'Populating the Digital Space for Cultural Heritage with Heritage Digital Twins', in *Data*, 7, p. 105 ss. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/data708105>.
- Nicolucci, F., Felicetti, A. (2025) 'Digital Twin Sensors in Cultural Heritage Ontology Applications', in *Sensors*, 24, p. 3978 ss. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/s24123978>.
- Marafini, F., Betti, M., Bartoli, Z.G., et al. (2024) 'Static and Dynamic Monitoring of Giovanni Pisano's Pulpit in Pistoia (Italy)', in Endo, Y. e Hanazato, T. (a cura di) *SAHC, RILEM Bookseries*, 47, Berlin/Heidelberg: Springer, pp. 197-210. Disponibile su: https://doi.org/10.1007/978-3-031-39603-8_17.
- Nicolucci, F., Felicetti, A. (2025) 'Digital Twins and the Stendhal Syndrome', in *Computers*, 14, p. 136. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/computers14040136>.



FIGURA 01

Pulpito di Giovanni Pisano nella Chiesa di S. Andrea a Pistoia.
Saiko, opera propria.



FIGURA 02

Mosaici della cupola del Battistero di Firenze.
M. Kabel, opera propria.



FIGURA 03

Venezia, Campanile e Palazzo Ducale.
M. Falbisoner, opera propria.



FIGURA 04

Firenze, Basilica di Santa Croce.
D. Delso.

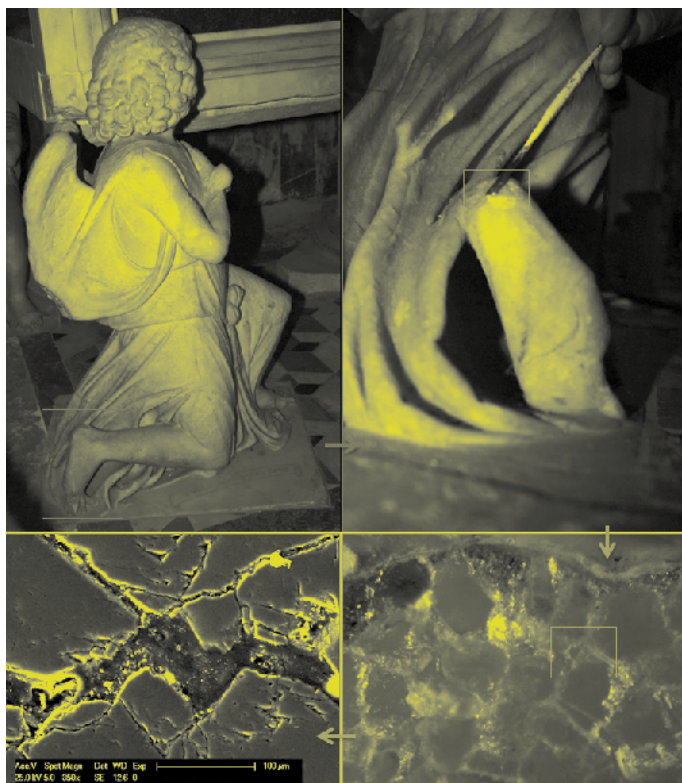
Capitolo 5



L'approccio interdisciplinare costituisce una chiave per lo sviluppo di strategie di tutela concrete e sostenibili.

Nuove tecnologie per il restauro

Autori	Maddalena Bassani Elena Tesser
Affiliazione	Università Iuav di Venezia



Chiesa di S. Martino di Castello (Venezia), Altare del Santo Sepolcro.
Verifica della presenza e dell'efficacia dei trattamenti conservativi
applicati durante gli anni Sessanta e Novanta del Novecento sugli
angeli in marmo del complesso decorativo.
E. Tesser, 2025.

Introduzione

Da oltre trent'anni il Laboratorio di Analisi dei Materiali Antichi (LAMA) dell'Università Iuav di Venezia rappresenta nel panorama nazionale e internazionale un punto di riferimento di grande rilievo nel campo del restauro e degli studi per la caratterizzazione minero-petrografica e chimico-fisica di materiali lapidei (ornamentali o da costruzione) e litoidi (laterizi, terrecotte, ceramiche, affreschi/dipinti murali, intonaci, malte ecc.), nonché di oggetti in vetro e in metallo (Lazzarini, 2006; Tesseret *et al.*, 2020; Conventi *et al.*, 2020; Bassani, 2024; Bassani, 2025). Le analisi archeometriche che il laboratorio compie si rivelano essenziali per determinare la provenienza e le tecnologie di produzione di materiali archeologici sia da contesti stratigrafici che da collezioni museali. Inoltre, grazie a un ricchissimo archivio e a strumentazioni all'avanguardia, il LAMA è in grado di ricostruire il palinsesto stratigrafico degli agenti sulle superfici dipinte, sia in relazione agli strati preparatori, sia all'individuazione dei diversi pigmenti e alla stesura dei colori, nonché sul loro degrado.

Negli ultimi anni, l'attenzione verso la conservazione dei materiali come garanzia di valorizzazione del patrimonio culturale ha orientato il LAMA verso ricerche applicative, con l'obiettivo di fornire soluzioni concrete per il restauro dei materiali da costruzione.

Nel contesto delle nuove tecnologie per il restauro, le competenze scientifiche e multidisciplinari del gruppo così come l'esperienza maturata nel settore hanno condotto a promuovere collaborazioni con enti e imprese, finalizzate a confrontare sperimentazioni di laboratorio basate su studi teorici con la realtà di cantiere (Tesser *et al.*, 2022; Stucchi *et al.*, 2020). Lo sviluppo di metodologie consolidate, che includono test su substrati coerenti con il costruito, formulazioni sperimentali e prove di invecchiamento accelerato e naturale, supporta il dialogo interdisciplinare indispensabile per scelte conservative consapevoli.

Limitarsi allo sviluppo laboratoriale senza considerare il contesto di cantiere può portare a soluzioni innovative ma difficilmente applicabili, mentre l'integrazione di competenze scientifiche, ingegneristiche e operative può consentire di progettare interventi efficaci e realmente applicabili.

L'approccio interdisciplinare costituisce una chiave per lo sviluppo di strategie di tutela concrete e sostenibili. Lo studio della vulnerabilità del costruito consente di analizzare sia i fattori forzanti, ambientali e antropici, che causano deterioramento, sia i prodotti secondari per alterazioni chimiche. L'uso combinato di tecniche analitiche tradizionali e metodi innovativi, quali analisi non invasive, imaging multispettrale e

sensori ambientali, permette di valutare in maniera puntuale lo stato di conservazione dei materiali e di rallentare il deterioramento.

Parallelamente, la valutazione dell'efficacia dei prodotti conservativi applicati in interventi di restauro precedenti permette di orientarsi tra le soluzioni disponibili sul mercato o di svilupparne di nuove realmente efficaci.

La combinazione di test di laboratorio, tecniche diagnostiche non invasive e modellistica predittiva favorisce la definizione di strategie di manutenzione in grado di garantire valorizzazione, fruibilità e sostenibilità economica e ambientale dei beni culturali. Questa visione integrata consente di affrontare le sfide del restauro con metodi innovativi, scientificamente fondati e applicabili, ponendosi al centro di un panorama di ricerca e applicazione tecnologica in continua evoluzione.

Riferimenti bibliografici

- Bassani, M. (2025) 'Testimonianze su ritrovamenti di vetri antichi in laguna: il contributo delle fonti d'archivio', in R. Barovier, M. Tirelli (a cura di) *Vetri di Laguna*, Atti del Convegno (Venezia 2023). Venezia: My Monkey, pp. 51-70.
- Bassani, M. (2024) 'La laguna sud di Venezia, fra archeologia e archivio', in R. Albiero, M. Bassani, G. D'Acunto, F. Madricardo (a cura di) *Venezia e i paesaggi costieri adriatici, fra antico e contemporaneo*, Atti del Convegno internazionale (Venezia 2023), Roma: L'Erma di Bretschneider, pp. 341-356.
- Conventi, A., D'Ignoli, K., Lazzarini, L., Tesser, E. (2020) 'Archaeometric investigations of the materials and techniques of two red figured kraters by the Painter of Louvre K240', in *Techné*, 49, pp. 124-133.
- Lazzarini, L. (2006) 'Poikiloi lithoi, versiculores maculae: i marmi colorati della Grecia antica. Storia, uso, diffusione, cave, geologia, caratterizzazione scientifica, archeometria, deterioramento' in *Marmora*, 2, supplemento 1. Pisa-Roma: Fabrizio Serra editore.
- Stucchi, N.M.E., Tesser, E., Antonelli, F., Benedetti, A., Zaccariello, G. (2020) 'Experimental silica nanoparticles products for the consolidation of silica stones' in *Monument future – decay and conservation of stone. Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, pp. 549-554.
- Tesser, E., Verità, M., Lazzarini, L., Falcone, R., Saguì, L., Antonelli, F. (2020) 'Glass in imitation of exotic marbles: An analytical investigation of 2nd century AD. Roman sectilia from the Gorga collection' in *Journal of Cultural Heritage*, 42, pp. 202-212.
- Tesser, E., Conventi, A., Majerle, F. (2022) 'Characterization of Barium Hydroxide Used as Consolidating Agent for Monumental Surfaces in Venice' in *Heritage*, 5(4), pp. 3280-3297.

Autori	Federica Menegazzo Michela Signoretto Elena Ghedini Sabrina Manente Alessandro di Michele Andrea Campostrini
Affiliazione	Università Ca' Foscari Venezia Università di Perugia Università di Bari Aldo Moro Istituto italiano di Tecnologia



Test fotocatalitico.
A. Campostrini, 2018.

Nanotecnologie fotocatalitiche: un approccio sostenibile per la conservazione del patrimonio architettonico

Il marmorino veneziano è un intonaco tradizionale, ampiamente utilizzato sia per interni che per esterni negli edifici storici di Venezia e del Veneto sin dal XVI secolo. La sua struttura è caratterizzata da strati sottili di malta, con finiture a base di calce e polvere di marmo, che offrono una superficie compatta e resistente. Le tecniche di applicazione seguono il metodo del *fresco su fresco*, e la protezione finale è storicamente affidata a sostanze naturali come oli, cere, acqua di calce o saponi vegetali, utilizzate come strato di finitura (Squassina, 2022; Doglioni *et al.*, 2017).

Nonostante le intrinseche qualità protettive, questi rivestimenti oggi si trovano esposti a nuove sfide ambientali, legate all'inquinamento atmosferico moderno, tra cui ossidi di azoto (NOx) e composti organici volatili (VOC, *Volatile Organic Compound*). Tali agenti, combinati con fattori ambientali caratterizzati da manifestazioni sempre più estreme (*e.g.*, umidità, luce, temperatura, risalita capillare), non solo danneggiano fisicamente e chimicamente le superfici. Ciò può, quindi, indurre un più facile attecchimento biologico, che porta alla crescita di comunità di Batteri, Funghi e persino di piante erbacee o arbustive (Stanaszek-Tomal, 2020; Warscheid e Braams, 2000). Questa maggiore suscettibilità al biodeterioramento rende le superfici vulnerabili a un degrado accelerato, difficilmente controllabile con le sole tecniche tradizionali.

Per affrontare questi problemi, questo progetto si è orientato verso l'impiego di nanomateriali fotocatalitici capaci di attivare reazioni chimiche per salvaguardare il substrato di interesse storico-artistico, utilizzando la luce solare e l'ossigeno atmosferico. In particolare, biossido di titanio (TiO₂) e ossido di zinco (ZnO) sono tra i nanomateriali più studiati per le loro proprietà di abbattimento degli inquinanti atmosferici, di *self-cleaning* e antimicrobiche. Entrambi, già impiegati con riscontri positivi in diversi settori, offrono potenzialità interessanti anche nel campo della conservazione del patrimonio culturale (Bresh *et al.*, 2023; Gómez-Ortíz *et al.*, 2013; Veltri *et al.*, 2019; Scappin *et al.*, 2022).

Nel lavoro di ricerca qui presentato, si è voluta unire la tradizione artigianale del marmorino veneziano con l'innovazione dei nanomateriali fotocatalitici. L'obiettivo principale è stato quello di arricchire il marmorino con nanoparticelle dalle proprietà antimicrobiche, senza alterarne l'estetica o comprometterne la compatibilità con i materiali storici. Per fare ciò si sono quindi sviluppati dei provini di intonaco a marmorino, seguendo le indicazioni della tradizione veneziana. Il lavoro è stato svolto in collaborazione con l'azienda UniSve s.r.l. (Unione Stuccatori Veneziani) che da vari anni è impegnata a mantenere vive alcune tecniche artigianali della tradizione veneziana che rischiano di andare perdute. Sono state valutate diverse

formulazioni per l'aggiunta dei fotocatalizzatori (Campostrini *et al.*, 2025; Zanadro *et al.*, 2021).

In dettaglio, l'ossido di zinco è stato aggiunto come additivo all'interno della formulazione dell'intonaco, ovvero direttamente nella malta, quindi come tecnologia da aggiungere a marmorini nuovi o a malta di reintegro; mentre il biossido di titanio è stato aggiunto allo strato di finitura superficiale, quindi applicabile sia a intonaci a marmorino di nuova fattura, che a materiali storici preesistenti.

I test condotti hanno dimostrato che entrambi i nanomateriali fotocatalitici non alterano l'aspetto originario della superficie trattata. In particolare, l'analisi condotta mediante microscopia ottica ed elettronica a scansione (SEM) ha confermato un'efficace alterazione della crescita microbica sulle superfici trattate, in presenza sia di TiO_2 che di ZnO . Questa attività è stata ricollegata alla formazione di specie reattive dell'ossigeno (ROS, *Reactive Oxygen Species*), che sono in grado di degradare sostanze inquinanti e possono ostacolare anche lo sviluppo dei microrganismi dannosi, andando ad interferire a livello cellulare con lo sviluppo e la crescita, prevenendo quindi il biodeterioramento.

La crescita di microorganismi, nello specifico i due Funghi *Penicillium italicum* e *Cladosporium sphaerospermum* prelevati da una cultura pura, è stata simulata tramite il loro inoculo direttamente sulla superficie dei provini di marmorino sviluppati *ad hoc*, quindi in una situazione di alto stress rispetto ad un caso reale. Si vuole sottolineare che le due muffe prese in considerazione provengono da alcuni campionamenti microbiologici effettuati su edifici veneziani cinquecenteschi intonacati a marmorino e con presenza di evidente crescita microbiologica.

FIGURA 01 – P. 194

È stato interessante osservare che i Funghi inoculati sulla superficie del marmorino additivato con i fotocatalizzatori hanno sviluppato ife di aspetto raggrinzito, non turgide, e spore chiaramente più piccole, cercando di adattarsi al nuovo substrato, meno ospitale. La presenza di ife e spore modificate è, infatti, indice di una variazione importante della potenzialità di un eventuale attecchimento sul substrato, in un caso reale.

FIGURA 02 – P. 194

Si è verificata, inoltre, la capacità di questi materiali di rimuovere macchie, partendo da test con coloranti organici modello in laboratorio (blu di metilene), per poi passare a test con macchie di sporco reale, come pennarelli o residui alimentari. I test hanno confermato l'efficacia del processo di *self-cleaning*, ovvero dell'abilità del materiale di degradare i depositi superficiali e riportare la superficie ad essere pulita.

Nel dettaglio, sono state misurate le proprietà colorimetriche della superficie, con particolare attenzione al parametro b^* dello spazio colore CIELAB. L'analisi ha previsto un confronto tra il campione prima della macchiatura e dopo l'esposizione alla luce per 240 minuti, al fine di determinare il deposito residuo. Inoltre, è stato confrontato il colore della superficie macchiata (non ancora esposta) con quello della stessa superficie dopo l'esposizione, per quantificare la quantità di deposito effettivamente degradato.

FIGURA 03 – P. 195

Dai risultati, si è osservato che l'impiego di sapone di Aleppo come finitura protettiva ha un lieve effetto di degradazione dei depositi, confermando dunque l'efficacia della finitura tradizionale. Tuttavia, si è notato un ulteriore aumento di questa proprietà una volta aggiunto il biossido di titanio. Questa sinergia tra sapone d'Aleppo e TiO_2 incrementa, dunque, l'efficacia del rivestimento di finitura, riducendo al contempo anche il rischio di distacco dei nanomateriali applicati sulla superficie, mantenendoli più stabili nel tempo.

Questi risultati sono di particolare rilevanza per il settore della conservazione architettonica, poiché dimostrano che è possibile migliorare la durabilità e la resistenza dei rivestimenti tradizionali senza comprometterne l'estetica o le caratteristiche originarie. L'uso dei fotocatalizzatori TiO_2 e ZnO non solo contrasta l'accumulo di inquinanti e la formazione di macchie, ma limita anche la proliferazione microbica, rappresentando una soluzione innovativa e sostenibile per la protezione di superfici architettoniche storiche, come quelle di marmorino.

In conclusione, la sperimentazione dimostra come la sinergia tra conoscenze artigianali, tecnologie innovative e pratiche sostenibili possa portare a significativi progressi nella protezione e valorizzazione del patrimonio edilizio. L'integrazione di materiali fotocatalitici nei rivestimenti di intonaco a marmorino offre un approccio promettente per la conservazione preventiva, inibendo il biodeterioramento e il deposito di materiale organico che potrebbe portare ad un danno estetico e successivamente anche strutturale, innescando pericolosi loop. Inoltre, l'impiego di fotocatalizzatori uniti al marmorino tradizionale può essere un mezzo per migliorare la qualità ambientale (sia in ambienti interni che esterni) e ridurre i costi di manutenzione a lungo termine.

La ricerca continuerà dunque lungo questo percorso, mirando a un'applicazione concreta su casi reali, con la necessaria cautela e piena consapevolezza del valore storico-artistico dei contesti coinvolti.

Riferimenti bibliografici

- Bersch, J., Flores-Colen, I., Masuero, A., et al. (2023) 'Photocatalytic TiO_2 -Based Coatings for Mortars on Facades: A Review of Efficiency, Durability, and Sustainability', in *Buildings*, Vol. 13(186), pp. 1-36. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/buildings13010186>.
- Campostrini, A., Manente, S., Ghedini, E., et al. (2025) 'Enhancing Venetian traditional marmorino with TiO_2 and ZnO for antimicrobial protection – A case study', in *Next Materials*, 7, Articolo 100384. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.nxmater.2024.100384>.
- Dogliani, F., Scappin, L., Squassina, A., et al. (2017) *Conoscenza e Restauro Degli Intonaci e Delle Superfici Murarie Esterne di Venezia. Campionature, Esemplificazioni, Indirizzi di Intervento*. Padova: Il Prato.
- Cómez-Ortiz, N., De la Rosa-García, S., González-Gómez, W., et al. (2013) 'Antifungal Coatings Based on $Ca(OH)_2$ Mixed with ZnO/TiO_2 Nanomaterials for Protection of Limestone Monuments', in *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5, pp. 1556-1565. Disponibile su: <https://doi.org/10.1021/am302783h>.
- Sabbioni, C., Bonazza, A., Zappia, G. (2002) 'Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal', in *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 3, pp. 83-88. Disponibile su: [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01163-9](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01163-9).
- Scappin, L., Campostrini, A., Zanardo, D., et al. (2022), 'Marmorino and photocatalysts: a meeting between tradition and innovation', in *International journal of architectural conservation and restoration*, 1, pp. 35-49. Disponibile su: <https://doi.org/10.57639/SIRA.INTR0104>.
- Sesana, E., Gagnon, A.S., Ciantelli, C., et al. (2021) 'Climate change impacts on cultural heritage: A literature review', in *WIREs Climate Change*, 12. Disponibile su: <https://doi.org/10.1002/wcc.710>.
- Squassina, A. (2022) 'Construction Wisdom: Preserving Venice with Both Tradition and Innovation', in *Studies in Conservation*, 67, pp. 253-259. Disponibile su: <https://doi.org/10.1080/00393630.2022.2046413>.
- Stanaszek-Tomal, E. (2020) 'Environmental Factors Causing the Development of Microorganisms on the Surfaces of National Cultural Monuments Made of Mineral Building Materials—Review' in *Coatings*, 10(1), pp. 1-19. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/coatings10121203>.
- Veltri, S., Palermo, A.M., De Filpo, G., et al. (2019) 'Subsurface treatment of TiO_2 nanoparticles for limestone: Prolonged surface photocatalytic biocidal activities', in *Building and Environment*, 149, pp. 655-661. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.038>.
- Warscheid, T., Braams, J. (2000) 'Biodeterioration of stone: a review', in *International Biodeterioration and Biodegradation*, 46, pp. 343-368. Disponibile su: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8).
- Zanardo, D., Ghedini, E., Menegazzo, F., et al. (2021) 'Traditional Venetian marmorino: Effect of zinc-based oxides on self-bleaching properties', in *Journal of Cultural Heritage*, 50, pp. 171-178. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.04.006>.



FIGURA 01

Aree di campionamento microbiologici su palazzi intonacati a marmorino nella Venezia insulare. S. Manente, 2019.

Marmorino Tradizionale

Marmorino additivato con fotocatalizzatori

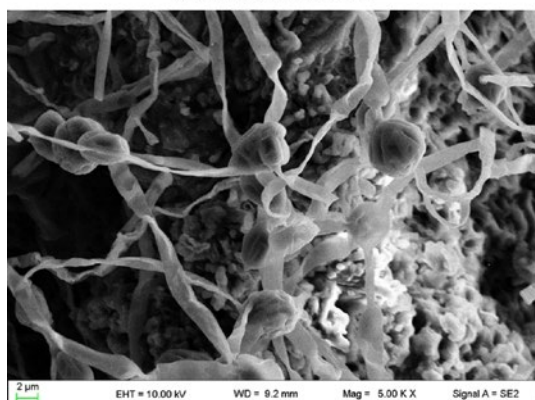


FIGURA 02

Micrografie SEM di ife e spore fungine presenti sui provini di marmorino tradizionale (a sinistra) e additivato con fotocatalizzatori (a destra). A. Di Michele, 2022.

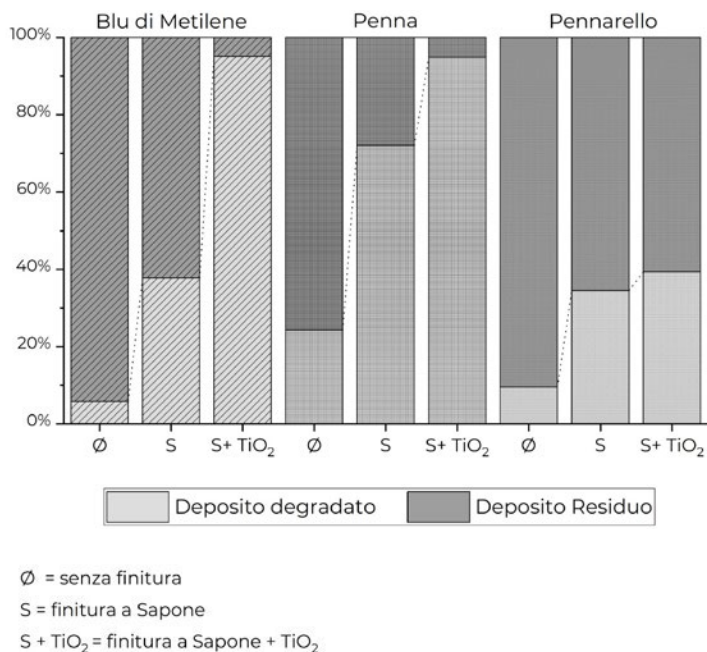


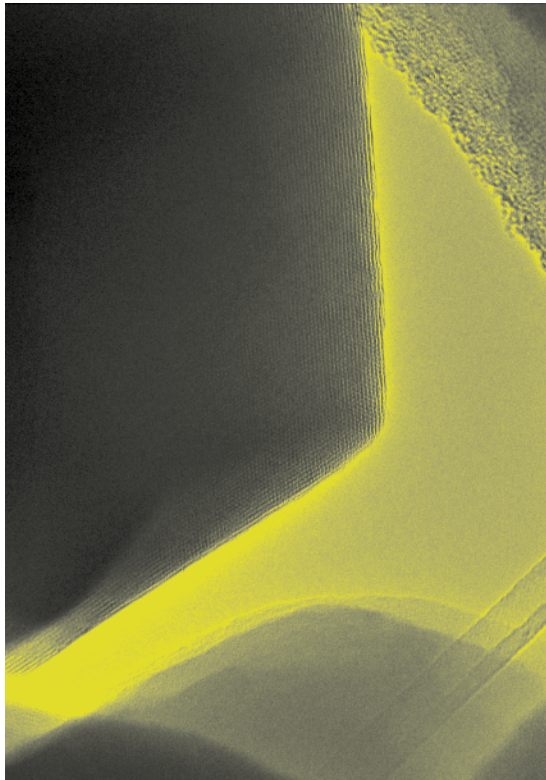
FIGURA 03

Grafico con a confronto le capacità di self-cleaning.

Provini in marmorino senza finitura (Ø), con finitura tradizionale a sapone (S) e con finitura a sapone con addizionate nanoparticelle di biossido di titanio (S+TiO₂).

A. Campostrini, luglio 2025.

Autori	Andrea Campostrini Pilar Bosch-Roig Agustí Sala-Luis Elena Ghedini Sabrina Manente Michela Signoretto Federica Menegazzo
Affiliazione	Università Ca' Foscari Venezia Universitat Politècnica de València Università di Bari Aldo Moro Istituto italiano di Tecnologia



Micrografia HR-TEM.
A.W. Roberson, 2024.

Estratti naturali e nanomateriali per proteggere le superfici lapidee dal biodeterioramento

Alcuni materiali lapidei, come marmo, granito e altri tipi di pietra, hanno sempre ricoperto un ruolo importante nella realizzazione di monumenti, sculture ed edifici storici. Questi materiali sono stati storicamente considerati simboli di resistenza e durabilità nel tempo e non solo testimoniano epoche passate, ma rappresentano anche una parte fondamentale del nostro patrimonio culturale attuale. Tuttavia, nonostante la loro apparente solidità, la conservazione del patrimonio e delle strutture architettoniche storiche è una sfida continua, resa ancora più complessa dal loro lento ma costante degrado. Non si tratta solo degli effetti visibili del tempo o degli agenti atmosferici: tra le cause più insidiose ci sono anche i microrganismi, capaci di attaccare le superfici in modo silenzioso ma efficace, sia all'esterno che all'interno degli edifici (Di Carlo *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2020; Zanardo *et al.*, 2021). Questo processo, noto come biodeterioramento, comporta cambiamenti fisici, chimici e biologici che con il tempo danneggiano la struttura del materiale. L'umidità e la temperatura creano condizioni favorevoli alla proliferazione microbica. In ambienti idonei, funghi e batteri colonizzano le superfici lapidee causando erosione fisico-chimica e macchie antiestetiche. Proprio perché il biodeterioramento rappresenta un problema serio per la tutela dei beni culturali, nel tempo sono state sperimentate diverse tecniche per limitarne gli effetti (Pinna, 2022; Lo Schiavo *et al.*, 2020). Il trattamento più comune è quello basato sull'uso di biocidi, impiegati per pulire le superfici colonizzate dai microrganismi. Tuttavia, questi prodotti sono spesso tossici, non solo per i microrganismi bersaglio, ma anche per l'ambiente e per chi li applica (de Campos *et al.*, 2022; Jones e Joshi, 2021). Da qui nasce un crescente interesse per alternative più sostenibili e naturali. In particolare, negli ultimi anni si è parlato molto dell'utilizzo di estratti vegetali – come gli oli essenziali (EOs) – come possibile soluzione per combattere il degrado biologico (Mutlu-Ingok *et al.*, 2020; Sala-Luis *et al.*, 2024). Queste sostanze, ricche di molecole con proprietà antimicrobiche, vengono già utilizzate in vari ambiti della conservazione, soprattutto per la pulitura della crescita microbiologica. Tuttavia, il loro impiego non è privo di sfide. Gli oli essenziali tendono a evaporare facilmente, il che ne limita l'efficacia nel tempo. Le molecole ad elevato potere antimicrobico presenti in questi prodotti sono anche quelle più volatili e che possono comportare variazioni cromatiche se non risciacquate adeguatamente. Per questi motivi, si stanno studiando modalità più sicure e controllate per il loro utilizzo (Russo e Palla, 2023; Santo *et al.*, 2023).

Una delle soluzioni più promettenti è l'incapsulamento in materiali che ne permettano un rilascio graduale e controllato. Tra questi, la silice mesoporosa ordinata, come l'MCM-41, si è rivelata particolarmente efficace:

grazie alla sua struttura porosa (con pori di circa 3 nanometri), riesce a trattenere le sostanze attive e a rilasciarle gradualmente, riducendone l'evaporazione, contrastando la potenziale colorazione della superficie trattata e anche il contatto diretto con l'operatore. Questo approccio consente anche di superare uno dei principali limiti degli EO nelle applicazioni preventive, dove la volatilità è un ostacolo (D'Agostino *et al.*, 2021; Fidanza e Caneva, 2019).

In questo studio, tre estratti vegetali sono stati incapsulati in particelle di silice mesoporosa MCM-41, per valutarne l'efficacia nel prevenire la crescita di funghi. Le sostanze selezionate sono: il Limonene, e gli oli essenziali di origano (*Origanum compactum*) e timo (*Thymus vulgaris*) – estratti già noti per le loro proprietà antimicrobiche e utilizzati nel campo della conservazione (Milagres de Almeida *et al.*, 2023). Puntare su estratti provenienti da piante diffuse nel bacino mediterraneo, facilmente reperibili in Italia e Spagna – i due paesi coinvolti in questo progetto – rappresenta una scelta strategica anche dal punto di vista della sostenibilità ambientale e della filiera locale (Bartoli *et al.*, 2024). In sintesi, gli estratti combinati con le nanocapsule di silice (Contessotto *et al.*, 2009), permettono di evitare evaporazione rapida e macchie indesiderate con l'obiettivo di unire la loro efficacia con la tecnologia dei materiali avanzati, per offrire soluzioni più sicure, naturali e sostenibili nella conservazione preventiva del patrimonio culturale.

Per testare questa tecnologia, sono stati condotti test preliminari valutando l'evaporazione degli estratti naturali, sia nella loro forma pura che incapsulati. È stato possibile confermare come l'incapsulamento degli estratti nelle particelle nanostrutturate permetta di ridurre la velocità di evaporazione, trattenendo le molecole volatili e garantendo una maggiore durabilità. In Figura 1a è possibile osservare i profili di evaporazione a confronto dei tre estratti liberi, mentre in Figura 1b si osserva la differenza tra quello dell'olio essenziale di origano libero e quello dello stesso estratto quando incapsulato nella silice mesoporosa MCM-41.

FIGURA 01 – P. 201

Nel contesto di questa ricerca, sono stati effettuati campionamenti microbiologici *in situ* da diversi substrati lapidei di interesse artistico. L'obiettivo era quello di isolare e studiare diversi microrganismi, come funghi e batteri, tipici del deterioramento microbiologico dei materiali lapidei di interesse culturale. Grazie a questa campagna, la ricerca si è focalizzata su una selezione dei funghi (muffe nello specifico) isolati da queste opere, basando la scelta sulla loro frequenza di comparsa e sugli effetti osservati. Uno dei danni più evidenti dell'attacco fungino è la produzione di pigmenti che, penetrando nella porosità della pietra, possono causare danni estetici significativi, alterando l'aspetto originale del materiale.

FIGURA 02 – P. 201

Per valutare l'efficacia degli estratti naturali contro i funghi selezionati, sono stati eseguiti test preliminari *in vitro* per determinare la concentrazione minima inibente (MIC), avendo come *endpoint* lo sviluppo del micelio fungino, e fungicida (MFC). I risultati hanno mostrato che l'olio essenziale di origano si è rivelato il più performante tra quelli testati, anche in piccole quantità. Il test è stato eseguito sia con gli estratti incapsulati nelle particelle di silice che liberi, evidenziando come l'incapsulamento diminuisce la quantità di prodotto necessario per raggiungere la MIC e la MFC; questo

fenomeno è stato osservato in tutte le concentrazioni studiate. Dopo aver ottenuto risultati promettenti nei test *in vitro*, si è passati agli esperimenti su provini di diversi substrati lapidei.

Per l'applicazione sui provini lapidei, la silice impregnata con l'olio essenziale di origano è stata inserita in un formulato sviluppato ad hoc in laboratorio. Per ottenere un formulato idrofobico, compatibile con il substrato e che fosse in grado di ancorare le nanocapsule di silice alla superficie, gli alcossidi di silicio MTES e TEOS sono stati uniti al biopolimero chitosano, per sviluppare un idrogel ibrido organico-inorganico. Si sono quindi studiate le proprietà del coating protettivo, che è risultato essere trasparente ($\Delta E < 3$ seguendo il test UNI EN 15886), senza cambiamenti in gloss superficiale, idrorepellente (UNI EN 15802) e permeabile al vapor d'acqua (UNI EN 15803). Per valutare invece le proprietà antimicrobiche i provini sono stati inseriti in contenitori e successivamente inoculati con i microrganismi selezionati, confrontandoli con i provini non trattati, seguendo un test sviluppato dagli autori (Campostrini *et al.*, 2025). I risultati sono stati inequivocabili: dopo 60 giorni, i provini non trattati mostravano una chiara colonizzazione fungina, con un evidente deterioramento dell'aspetto. Al contrario, i provini trattati con il *coating* non presentavano segni di colonizzazione né degradazione, dimostrando un'efficace protezione contro i funghi presi in esame per questa fase dello studio.

FIGURA 03 – P. 202

Per studiare più a fondo questa interazione, sono state effettuate analisi con microscopio ottico degli inoculi fungini coltivati su terreno di coltura, e analisi Cryo-FE-SEM (Microscopia Elettronica a Scansione in condizioni criogeniche) sui funghi cresciuti direttamente su substrati in marmo. Queste analisi hanno rivelato come le ife fungine siano in grado di penetrare nel substrato nei materiali non trattati, a differenza dei campioni trattati con la tecnologia sviluppata nel corso di questa ricerca che hanno mostrato una protezione totale: la crescita fungina è stata completamente inibita e le superfici sono rimaste intatte e libere da attacchi microbiologici.

FIGURA 04 – P. 203

I risultati ottenuti confermano dunque l'efficacia della tecnologia proposta, che combina l'azione antimicrobica degli estratti naturali e la matrice mesoporosa delle particelle di silice MCM-41. L'incapsulamento ha dimostrato di migliorare la stabilità e la durata degli oli essenziali, riducendone l'evaporazione e aumentando l'efficienza contro microrganismi deterioranti. I test *in vitro* e *in situ* su provini lapidei evidenziano una chiara protezione dalle colonizzazioni fungine, senza alterare le caratteristiche estetiche e fisiche del materiale. Questi risultati pongono le basi per lo sviluppo di trattamenti conservativi più sostenibili, sicuri e compatibili con i materiali storici. In vista di una futura applicazione su scala reale, saranno fondamentali ulteriori studi di durabilità e resistenza agli agenti atmosferici, al fine di garantire prestazioni a lungo termine in contesti espositivi e ambientali differenti.

Riferimenti bibliografici

- Bartoli, F., Corradi, L., Hosseini, Z., et al. (2024) 'In Vitro Viability Tests of New Ecofriendly Nanosystems Incorporating Essential Oils for Long-Lasting Conservation of Stone Artworks', in *Gels*, 10(2), p. 132. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/gels10020132>.
- Campostrini, A., Sala-Luis, A., Bosch-Roig, P., et al. (2025) 'Mesoporous silica and vegetal extracts combined as sustainable stone heritage protection against biodeterioration', in *Applied Microbiology and Biotechnology*, 109(1), p. 99. Disponibile su: <https://doi.org/10.1007/s00253-025-13475-5>.
- Contessotto, L., Ghedini, E., Pinna, F., et al. (2009) 'Hybrid Organic-Inorganic Silica Gel Carriers with Controlled Drug-Delivery Properties' in *Chemistry – A European Journal*, 15(44), pp. 12043-12049. Disponibile su: <https://doi.org/10.1002/chem.200900603>.
- D'Agostino, G., Giambra, B., Palla, F., et al. (2021) 'The Application of the Essential Oils of *Thymus vulgaris* L. and *Crithmum maritimum* L. as Biocidal on Two Tholu Bommalu Indian Leather Puppets' in *Plants*, 10 (8), p. 1508. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/plants10081508>
- de Campos, B., Figueiredo, J., Perina, F., et al. (2022) 'Occurrence, effects and environmental risk of antifouling biocides (EU PT2): Are marine ecosystems threatened?' in *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52 (18), pp. 3179-3210. Disponibile su: <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1910003>.
- Di Carlo, E., Barresi, C., Palla, F. (2022), 'Biodeterioration', in *Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage*, Cham:Springer, pp. 1-30. Disponibile su: https://doi.org/10.1007/978-3-030-97585-2_1.
- Fidanza, M.R., Caneva, G. (2019) 'Natural biocides for the conservation of stone cultural heritage: A review', in *Journal of Cultural Heritage*, 38, pp. 271-286. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.01.005>.
- Jones, I.A., Joshi, L.T. (2021) 'Biocide Use in the Antimicrobial Era: A Review', in *Molecules*, 26(8), p. 2276. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/molecules26082276>.
- Liu, X., Qian, Y., Wu, F., et al. (2020), 'Microbial deterioration and sustainable conservation of stone monuments and buildings' in *Nature sustainability*, 3 pp. 991-1004. Disponibile su: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00602-5>.
- Lo Schiavo, S., De Leo, F., Urzi, C. (2020) 'Present and Future Perspectives for Biocides and Antifouling Products for Stone-Built Cultural Heritage: Ionic Liquids as a Challenging Alternative', in *Applied Sciences*, 10(18), p. 6568. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/app10186568>.
- Milagres de Almeida, J., Crippa, B.L., Martins Alencar de Souza, V.V., et al. (2023) 'Antimicrobial action of Oregano, Thyme, Clove, Cinnamon and Black pepper essential oils free and encapsulated against foodborne pathogens', in *Food Control*, 144, p. 109356. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109356>.
- Mutlu-Ingok, A., Devecioglu, D., Dikmetas, D.N., et al. (2020) 'Antibacterial, Antifungal, Antimycotoxicogenic, and Antioxidant Activities of Essential Oils: An Updated Review', in *Molecules*, 25(20), p. 4711. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/molecules25204711>.
- Pinna, D. (2022) 'Can we do without biocides to cope with biofilms and lichens on stone heritage?', in *International Biodeterioration & Biodegradation*, 172, p. 105437. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2022.105437>.
- Russo, R., Palla, F. (2022) 'Plant Essential Oils as Biocides in Sustainable Strategies for the Conservation of Cultural Heritage' in *Sustainability*, vol 15(11), p. 8522. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/su15118522>.
- Sala-Luis, A., Oliveira-Urquira, H., Bosch-Roig, P., et al. (2024) 'Eco-Sustainable Approaches to Prevent and/or Eradicate Fungal Biodeterioration on Easel Painting', in *Coatings*, 14(1), p. 124. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/coatings14010124>.
- Santo, A., Agostini, B., Cuzman, O., et al. (2023) 'Essential oils to contrast biodeterioration of the external marble of Florence Cathedral' in *Science of the Total Environment*, 877(162913), pp. 1-10. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162913>.
- Zanardo, D., Ghedini, E., Menegazzo, F., et al. (2021) 'Traditional Venetian marmorino: Effect of zinc-based oxides on self-bleaching properties', in *Journal of Cultural Heritage*, 50, pp. 171-178. Disponibile su: <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2021.04.006>.

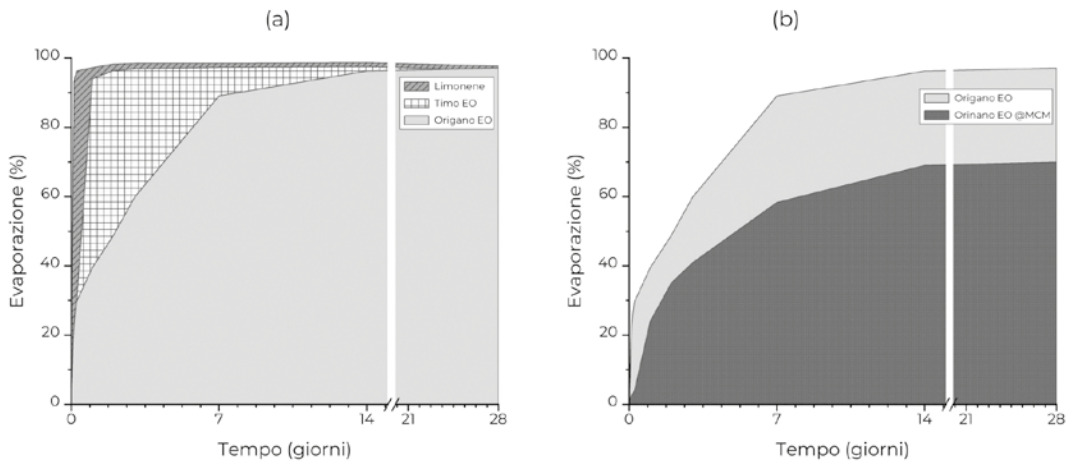


FIGURA 01

Profili di evaporazione degli estratti naturali liberi (1a) e profili di evaporazione dell'olio essenziale di origano libero ed incapsulato (1b).
A. Campostrini, 2025.

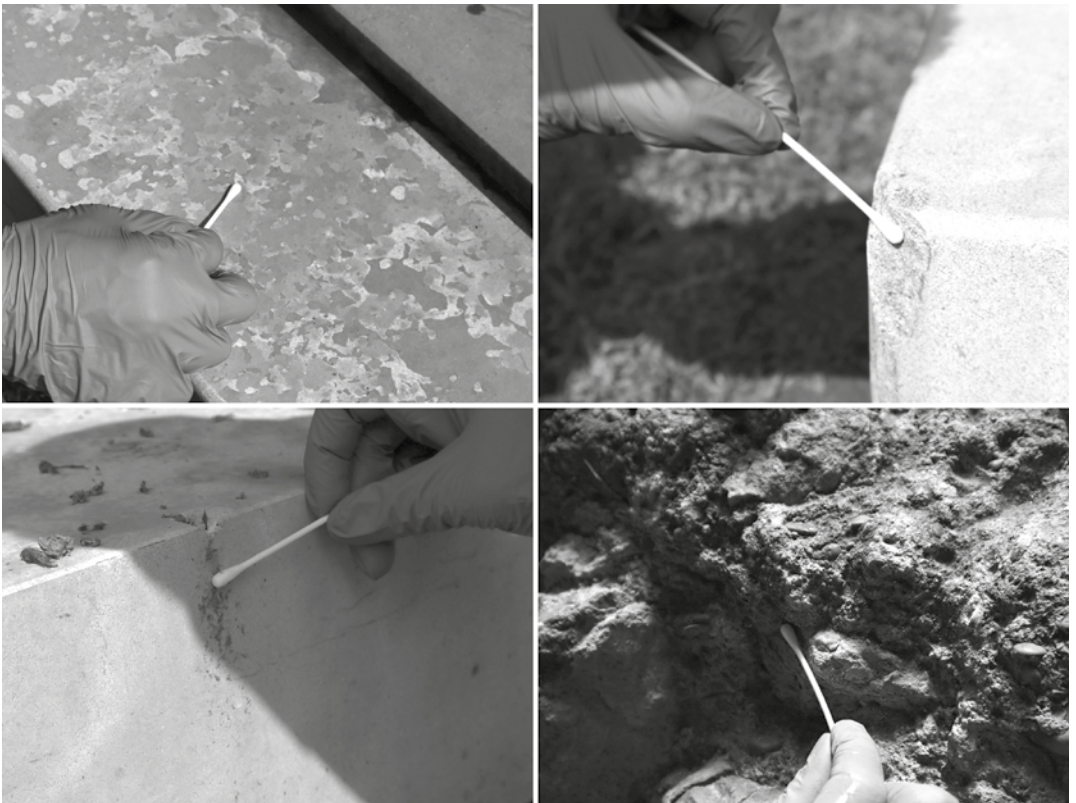


FIGURA 02

Campionamenti microbiologici non invasivi tramite tampone umido su diversi substrati lapidei.
P. Bosch-Roig, 2023.

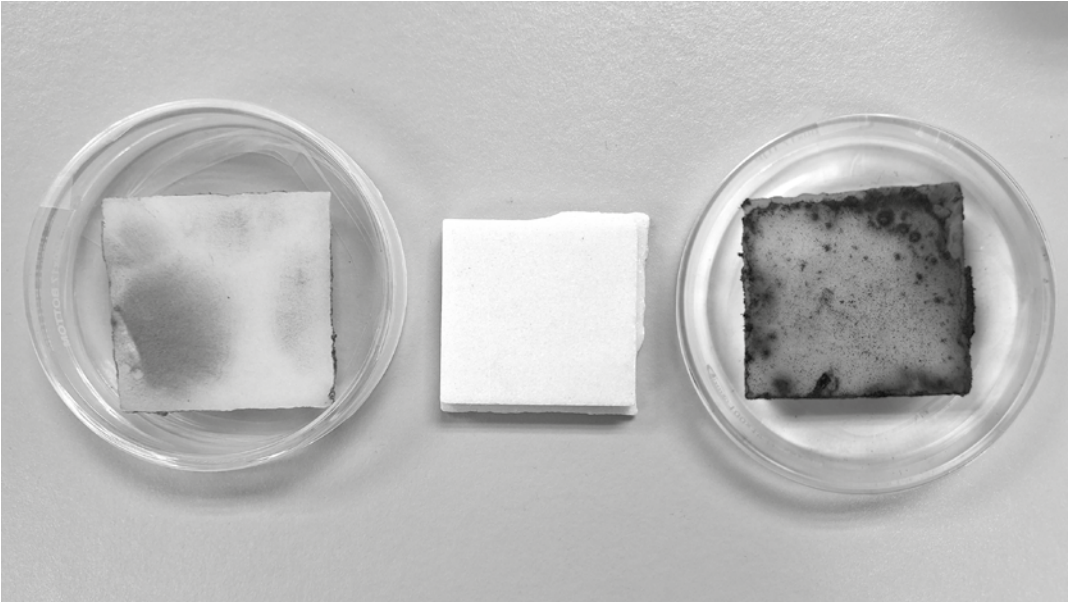


FIGURA 03

Provini di marmo con colonizzazione fungina dei due funghi selezionati (ai lati), con al centro un provino intonso di riferimento.

A. Campostrini, 2023.

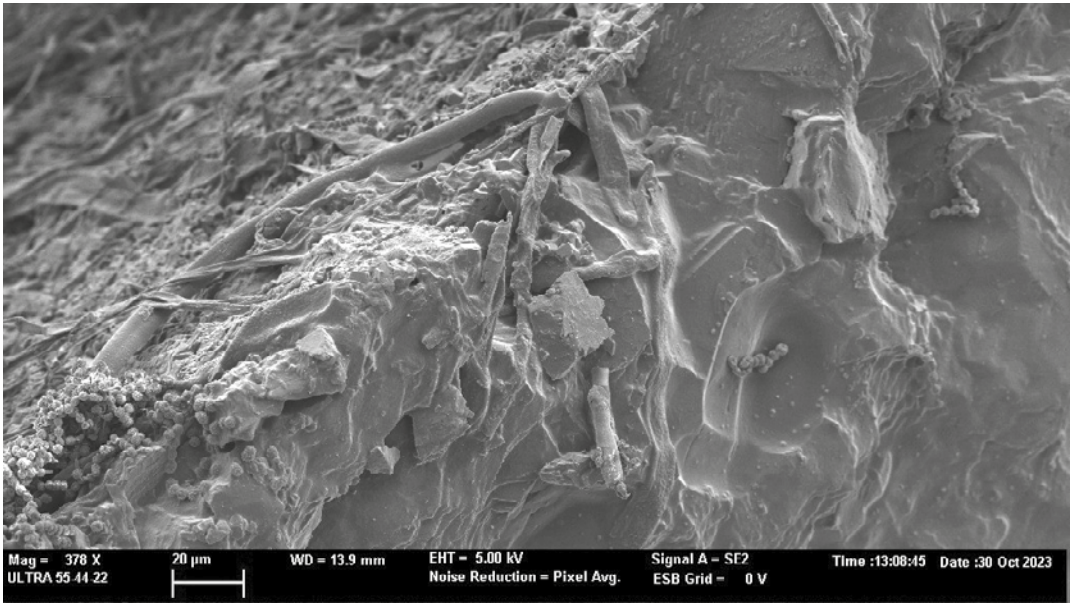


FIGURA 04

Micrografia Cryo-FE SEM dove si osserva la ifa fungina che ha penetrato nel substrato lapideo.
A. Campostrini, 2023.

Autori

Fabrizio Benvenuti
Luca Benvenuti

Affiliazione

Co.New Tech. Srl



Palazzo Ducale, Venezia.
Ispezione della facciata tramite operatori specializzati e drone.
L. Benvenuti, 2025.

M4PO – Monitoraggio 4.0: modello operativo per la conservazione programmata del patrimonio architettonico in ambiente complesso

Il progetto M4Po propone un protocollo operativo avanzato per il monitoraggio e la conservazione programmata del patrimonio architettonico in contesti ambientali complessi, con particolare attenzione agli edifici storici situati in aree urbane ad alta densità e sottoposti a vincoli di tutela. La metodologia combina acquisizioni multisensoriali, sistemi informativi interoperabili e modelli di intelligenza artificiale a supporto dell'analisi diagnostica e della pianificazione manutentiva, in conformità al quadro normativo e alle linee guida tecniche vigenti per il settore della conservazione dei beni culturali. Il caso studio del Palazzo Ducale di Venezia ha permesso di validare il protocollo in condizioni operative reali, dimostrando vantaggi in termini di accuratezza, ottimizzazione dei tempi e tracciabilità delle informazioni. M4Po si configura come un modello procedurale scalabile, orientato alla sostenibilità e alla trasformazione digitale, in linea con gli obiettivi del progetto PNRR, iNEST - PNRR, iNEST-Interconnected Nord-Est Innovation Ecosystem, Spoke 4 - City, Architecture, Sustainable Design, RT2 - Heritage, recovery, conservation e con le attuali sfide nella gestione del patrimonio culturale.

Il monitoraggio e la conservazione programmata degli edifici storici rappresentano oggi una necessità strategica per garantire la tutela del patrimonio culturale, poiché l'evoluzione dei fattori di rischio, dal cambiamento climatico all'inquinamento, fino all'intensificazione dell'uso urbano, ha accelerato i processi di degrado e messo in crisi approcci conservativi frammentati e non coordinati (Della Torre, 2003; SIRA, 2023). In assenza di strumenti strutturati, le strategie di conservazione preventiva faticano a garantire tempestività, coerenza e continuità operativa. In questo contesto, il progetto M4Po nasce con l'obiettivo di proporre un modello capace di integrare rilevamento, analisi e pianificazione in un unico flusso operativo, riducendo la distanza tra fase diagnostica e decisione d'intervento. Il protocollo, concepito come struttura modulare, si fonda sull'uso mirato di tecnologie digitali e sull'introduzione controllata dell'intelligenza artificiale come strumento di supporto, mantenendo centrale la valutazione dell'operatore. Questa impostazione è stata sviluppata per garantirne la trasferibilità anche in contesti complessi, puntando su un'efficienza che va oltre l'esecuzione tecnica e include la condivisione rapida di dati verificabili, tracciabili e aggiornabili tra attori diversi, in linea con le tempistiche del cantiere e della gestione ordinaria. L'applicazione sperimentale al caso del Palazzo Ducale di Venezia (MUVE, 2023) ha rappresentato un banco di prova per verificarne l'adattabilità e solidità metodologica in condizioni operative reali, fornendo al contempo elementi di riflessione su come la digitalizzazione possa incidere concretamente sulla sostenibilità e l'efficacia delle pratiche di conservazione (REbuild Italia, 2023).

METODOLOGIA

Il protocollo operativo è il risultato di un processo integrato che combina strumenti tecnologici e competenze specialistiche. Non si limita a introdurre tecnologie avanzate nella conservazione, ma definisce un impianto operativo capace di supportare in modo strutturato la gestione programmata del patrimonio architettonico. La metodologia si articola in fasi interconnesse che includono: analisi della documentazione preesistente, rilievi multisensoriali, strutturazione dei dati in formato interoperabile, analisi assistita da intelligenza artificiale e restituzione finale su piattaforme digitali a supporto della pianificazione e del monitoraggio. In questo assetto, gli strumenti adottati non sostituiscono i processi tradizionali, ma ne potenziano l'efficacia integrando rilievo, interpretazione e automazione. La definizione del protocollo è iniziata con uno studio preliminare volto a individuare le condizioni operative di applicazione, puntando a una metodologia realmente utilizzabile nei cantieri di restauro, in particolare nei centri storici soggetti a vincolo architettonico. Il caso studio del Palazzo Ducale di Venezia, per dimensioni, articolazione e valore monumentale, ha costituito un contesto applicativo ottimale. Parallelamente all'analisi del contesto fisico e normativo, il confronto con tecnici e responsabili di cantiere ha permesso di evidenziare criticità ricorrenti: difficoltà di rilievo e documentazione, tempi ridotti, scarsa integrazione digitale e frammentazione informativa. Da queste premesse sono derivati gli obiettivi del protocollo: interoperabilità, sostenibilità, aggiornabilità e monitoraggio ciclico, orientando lo sviluppo verso soluzioni flessibili e aderenti alla realtà operativa.

Il protocollo M4Po è stato concepito con una struttura modulare per assicurare flessibilità, scalabilità e adattabilità a contesti diversi. Si articola in quattro macrofasi interconnesse:

- M1 acquisizione dei dati pregressi e nuovi rilievi, calibrati sulle condizioni del sito e mirati alla massima completezza;
- M2 elaborazione dei dati da parte di professionisti, con supporto di strumenti diagnostici e IA;
- M3 gestione interoperabile e pianificazione conservativa, integrando le informazioni in un unico ambiente per attività cicliche;
- M4 validazione con verifica degli esiti, tracciabilità delle operazioni e diffusione ai soggetti coinvolti.

Questa sequenza allinea progressivamente osservazione, interpretazione e intervento, mantenendo coerenza metodologica e adattabilità alle dinamiche di cantiere.

FIGURA 01 – P. 210

L'acquisizione dei dati adotta una strategia integrata, selezionando le tecniche in funzione delle condizioni del cantiere e degli obiettivi diagnostici. Il protocollo combina laser scanner terrestri e fotogrammetria aerea per ottenere un modello 3D completo e aggiornabile, includendo aree non direttamente accessibili come prospetti affacciati sui canali (Cabrelles *et al.*, 2009).

FIGURA 02 – P. 211

FIGURA 03 – P. 212

La termografia aerea consente inoltre di individuare fenomeni legati a umidità, dispersioni termiche o distacchi, ampliando le possibilità di

analisi. Per le ispezioni di dettaglio, indagini diagnostiche puntuali e map-pature digitali dirette, operatori specializzati¹ intervengono su fune, evi-tando l'allestimento di ponteggi tradizionali, ottimizzando tempi e risorse e minimizzando l'impatto ambientale.

FIGURA 04 – P. 213

Le tecnologie (hardware e software) sono scelte tra le più idonee e aggiornate disponibili, sostituibili in base all'evoluzione tecnica e alle esigenze del cantiere, senza vincoli di brand. Il risultato è un *dataset* georiferito e navigabile, base solida per analisi, interpretazione e pianificazione, garan-tendo coerenza metodologica lungo l'intero processo operativo.

La fase di elaborazione trasforma le informazioni raccolte in contenuti operativi per la pianificazione conservativa, attraverso la gestione integra-ta dei contributi specialistici. Rilievi 3D, ortofoto, termografie, dati CAD e descrittivi vengono correlati e armonizzati in un formato interoperabile basato sullo standard aperto IFC, consentendo l'integrazione in ambienti BIM di nuvole di punti, modelli mesh e documentazione tecnica, e gene-rando quadri conoscitivi coerenti e aggiornabili (Bruno *et al.*, 2020; Parente *et al.*, 2025). La mappatura del degrado e la redazione delle relative schede² da parte del restauratore³, seguono le norme tecniche nazionali ed europee (UNI, 2006; 2012) e i decreti ministeriali del MiC, garantendo uniformità e tracciabilità nella documentazione dello stato di conservazione. Il proto-collo integra, in via sperimentale, strumenti di intelligenza artificiale per la classificazione visiva dei fenomeni e la generazione automatica di proposte descrittive e operative, mantenendo il ruolo decisionale in capo all'ope-ratore. I dati così organizzati costituiscono la base per piani di intervento mirati, ottimizzando risorse e riducendo l'incertezza nelle fasi successive.

INTEGRAZIONE SPERIMENTALE DELL'IA

In continuità con la fase di elaborazione, il protocollo ha sperimentato l'impiego di un sistema di IA a supporto della lettura delle superfici, con l'obiettivo di ottimizzare i tempi nella valutazione dello stato di conserva-zione. L'architettura sviluppata integra modelli open source, come Groun-dingDINO per il riconoscimento semantico e SAM per la segmentazione (Kirillov *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2023), all'interno di un modello proprietario sottoposto a *fine-tuning* supervisionato su un *dataset* di oltre 1.000 imma-gini annotate da restauratori qualificati mediante piattaforma di etichet-tatura avanzata, secondo criteri tecnico-scientifici allineati alla termino-logia e alle classificazioni in uso nei cantieri di restauro, con distinzione tra patine, macroflora, lesioni ecc. Il *dataset* è stato arricchito con estratti testuali provenienti da relazioni tecniche di intervento, impiegati per l'addestramento di modelli di linguaggio (LLM) destinati alla generazione automatica di descrizioni diagnostiche e proposte operative preliminari (Chen *et al.*, 2025). Il sistema così configurato produce per ciascun rilievo una prima mappatura dei fenomeni di degrado, associata a schede descrittive in formato interoperabili PDF e IFC/BIM.

FIGURA 05 – P. 214

L'approccio mantiene una logica ibrida: l'IA elabora un'analisi prelimi-nare strutturata, mentre la validazione, la correzione e l'integrazione dei risultati restano in capo all'operatore. Testato sul caso studio del Palaz-zo Ducale di Venezia, il modello ha confermato la solidità metodologica

dell'integrazione, aprendo prospettive per l'implementazione in piattaforme CDE e sistemi HBIM per l'importazione diretta di mappe di degrado e schede IFC nel *Digital Twin* (Ezz et al., 2025), garantendo aggiornabilità e tracciabilità.

La fase di elaborazione confluisce in un'infrastruttura digitale concepita per garantire gestione strutturata, interoperabilità e fruibilità operativa. Il protocollo adotta piattaforme BIM/GIS modulare, in grado di integrare modelli 3D, fotopiani, mappature del degrado, schede di restauro e documentazione tecnica in un unico flusso informativo. L'esperienza applicativa ha impiegato una piattaforma *cloud* (usBIM) con interoperabilità avanzata, collaborazione in tempo reale e moduli estendibili, operante su formati standard (IFC, PDF/A, CSV) compatibili con ambienti GIS/BIM (Logothetis, Delinikolas e Stylianidis, 2017). La tracciabilità è stata rafforzata dall'integrazione di notarizzazione blockchain per certificare produzione e modifiche dei documenti chiave (Del Vacchio e Bifulco, 2022; He, 2023). Questo ambiente condiviso supporta confronto, revisione e aggiornamento continuo, ponendo le basi per *Digital Twin* conservativi orientati al monitoraggio e alla gestione predittiva. L'applicazione sul caso studio ha validato l'efficacia dell'integrazione tra rilievi multisensoriali, gestione digitale e intelligenza artificiale, confermando le potenzialità operative e strategiche.

RISULTATI E PROSPETTIVE FUTURE

La sperimentazione del protocollo M4Po sul caso del Palazzo Ducale di Venezia ha confermato la solidità metodologica e l'efficacia operativa del modello anche in un contesto di elevata complessità tecnica, normativa e logistica. Il confronto con monitoraggi precedenti sulle medesime superfici e in contesti analoghi evidenzia un incremento della quantità di dati di circa il 50% e del quadro qualitativo di circa il 30%, con una riduzione dei tempi medi di acquisizione e di elaborazione di circa il 30%. L'adozione di una piattaforma integrata ha aumentato l'efficienza gestionale pari a circa il triplo rispetto al valore iniziale, favorendo pianificazione ciclica automatizzata, coerenza metodologica e completezza documentale prossima alla piena copertura, anche grazie a sistemi di tracciabilità continua basati su blockchain. L'integrazione in tempo reale dei contributi specialistici ha eliminato lunghe fasi di armonizzazione manuale, riducendo del 40% le attività di coordinamento e minimizzando le ridondanze. Dal punto di vista tecnologico, l'analisi assistita da IA ha fornito risultati coerenti con le valutazioni specialistiche nel 65% delle prove campione, soprattutto su immagini ravvicinate o porzioni limitate di superficie, risultando utile per accelerare la mappatura e redigere descrizioni sintetiche dei fenomeni, pur lasciando il giudizio finale all'operatore. La notarizzazione blockchain, integrata nei flussi BIM, ha garantito tracciabilità e certificazione temporale delle modifiche, rafforzando la validità probatoria del dato digitale. La validazione sperimentale del protocollo, pur confermando l'efficacia tecnica e metodologica, ha evidenziato alcune criticità e barriere operative rilevanti per l'applicazione sistematica. Le principali riguardano le tempistiche autorizzative⁴ (SABAP, volo con drone), mitigabili con una pianificazione strutturata dei monitoraggi, e la necessità di uniformare l'uso delle piattaforme tra operatori con competenze eterogenee, affrontabile con formazione avanzata mirata, così da ottimizzare l'integrazione di dati diagnostici ad alta densità, quali termografie, indagini multispettrali, analisi chimico-fisiche e modelli 3D. Sul piano gestionale, restano barriere legate ai costi iniziali di infrastrutture digitali, tecnologie di rilievo, software specialistici e formazione, spesso gravosi

per PMI e amministrazioni pubbliche. Tali investimenti sono tuttavia compensabili nel medio-lungo periodo, grazie alla riduzione dei tempi operativi, alla diminuzione degli errori e a una pianificazione manutentiva più efficace.

L'impiego dell'IA in ambito conservativo richiede un equilibrio attento tra potenzialità e limiti, poiché classificazioni errate, bias derivanti da *dataset* parziali o opacità algoritmica possono incidere in modo significativo sulle decisioni di restauro. Garantire tracciabilità metodologica, supervisione diretta da restauratori¹ qualificati e documentazione completa delle fasi di analisi non è solo una precauzione tecnica, ma un requisito per preservare l'affidabilità del processo, soprattutto in presenza di beni di alto valore storico e simbolico. In questa prospettiva, l'evoluzione del protocollo guarda a scenari in cui *Digital Twin* conservativi consentano un monitoraggio continuo e una gestione predittiva (CNR, 2025), modelli IA simulino l'evoluzione del degrado rispetto a variabili ambientali e strutturali, i *dataset* di training si arricchiscano di materiali e contesti eterogenei e il dialogo con SABAP e amministrazioni locali favorisca la standardizzazione del metodo a livello nazionale. In questa configurazione, M4Po⁵ si propone non solo come strumento operativo, ma come metodologia scalabile e adattiva, capace di coniugare innovazione tecnologica, sostenibilità gestionale e responsabilità etica nella conservazione programmata del patrimonio culturale.

Riferimenti bibliografici

- Bruno, S., Fatiguso, F., Musicco, A. (2020) 'HBIM nei progetti di recupero e restauro: gestione informativa e automatizzata dei processi di diagnostica', in *Ingenio*. Disponibile su: <https://www.ingenio-web.it> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Cabrelles, M., Lerma, J.L., Zaragozí, J., et al. (2009) 'Integration of 3D laser scanning, photogrammetry and thermography to record architectural monuments', in *Proceedings of the 22nd CIPA Symposium*, Kyoto, Japan, 11–15 October, pp. 83–88.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) (2025) *Il progetto ARTEMIS e i Digital Twin reattivi*. Disponibile su: <https://www.cnr.it> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Della Torre, S. (a cura di) (2003) *La conservazione programmata del patrimonio storico architettonico*. Milano: Guerini.
- Del Vacchio, E., Bifulco, F. (2022) 'Blockchain in Cultural Heritage: Insights from Literature Review', in *Sustainability*, 14(4), p. 2324. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/su14042324>.
- Ezz, M.S., Soliman, A. M., Aldelgawy, M., et al. (2025) 'Utilizing 3D GIS for the sustainable management of UNESCO World Heritage Sites in Saudi Arabia', in *Frontiers in Built Environment*, 11, 1550124. Disponibile su: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1550124>.
- He, X. (2023) 'Understanding the differences between CLIP, Grounding DINO, and SAM', in *Medium*. Disponibile su: <https://medium.com> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., et al. (2023) 'Segment Anything', in *Proceedings of ICCV 2023*. Disponibile su: <https://arxiv.org/abs/2304.02643> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Liu, S., Zeng, Z., Ren, T., et al. (2023) 'Grounding DINO: Marrying DINO with Grounded Pre-Training', in *Proceedings of ECCV 2024*. Disponibile su: <https://arxiv.org/abs/2303.05499> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Logothetis, S., Delinikolas, P., Stylianidis, E. (2017) 'Building information modelling for cultural heritage: A review', in *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W2, pp. 177–183. Disponibile su: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-177-2017>.
- MUVE (2023) 'Restauro per la sala delle Quattro Porte di Palazzo Ducale', *Fondazione Musei Civici di Venezia*. Disponibile su: <https://palazzoducale.visitmuve.it/it/il-museo/restauri/restauro-sala-quattro-porte/> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Parente, M., Bruno, N., Ottoni, F. (2025) 'HBIM and Information Management for Knowledge and Conservation', in *Heritage*, 8(8), p. 306. Disponibile su: <https://doi.org/10.3390/heritage8080306>.
- REbuild Italia (2023) 'Rigenerare l'edilizia storica. La dimensione green come valore anche per edifici del passato', *Rebuild Italia*. Disponibile su: <https://www.rebuilditalia.it> (Ultimo accesso: 10 agosto 2025).
- Società Italiana per il Restauro dell'Architettura (SIRA) (2023) *Documento di indirizzo per la qualità dei progetti di restauro dell'architettura*. Disponibile su: <https://www.sira-ristauroarchitettonico.it> (Ultimo accesso: 27 maggio 2025).
- UNI (2006) *UNI 1182:2006 – Beni culturali. Materiali lapidei – Forme di alterazione*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- UNI (2012) *UNI EN 16096:2012 – Conservazione dei beni culturali. Condizione di conservazione di immobili storici*. Milano: Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

Note

- 1 Operatori su fune ex art. 116, D.Lgs. 81/2008 e All. XXI.
- 2 Schedatura conforme UNI EN 16095:2012 e UNI EN 16096:2012, in ottemperanza al D.Lgs. 42/2004.
- 3 Restauratore qualificato ex art. 29, c. 6, D.Lgs. 42/2004 e D.M. 22.08.2019
- 4 Autorizzazioni ENAC (Reg. SAPR) e nulla osta SABAP ex art. 21, D.Lgs. 42/2004.
- 5 Protocollo e modello IA consultabili su m4po.it previa autenticazione.

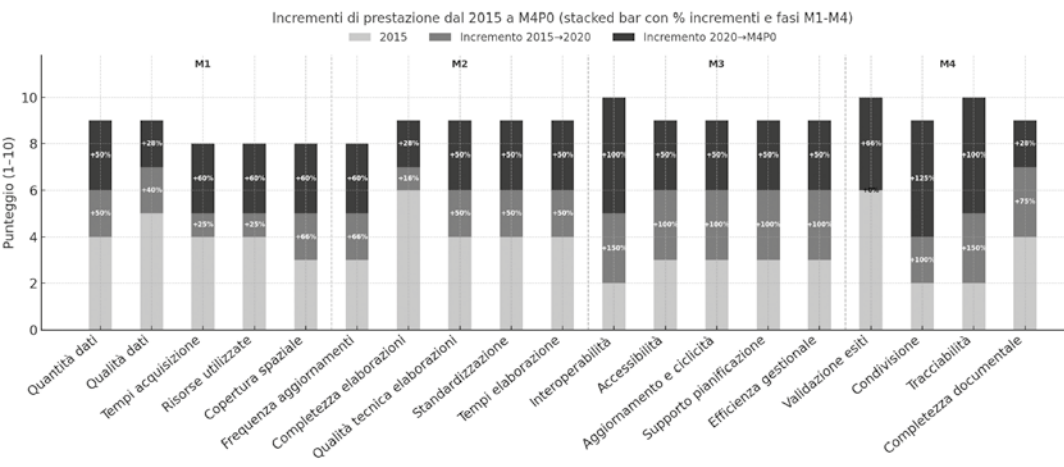
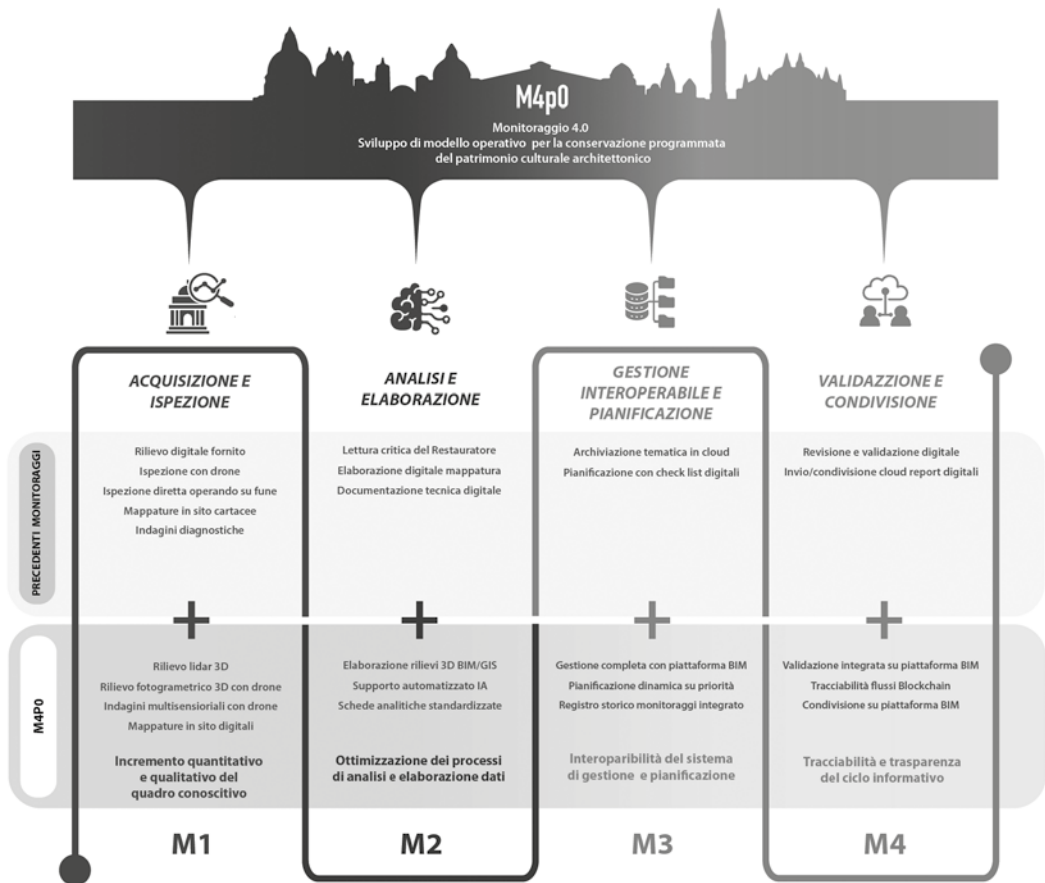


FIGURA 01
Protocollo operativo M4PO e incrementi di prestazione.
L. Benvenuti, 2025.



Perspective 30°

Snap: Axis, 3D

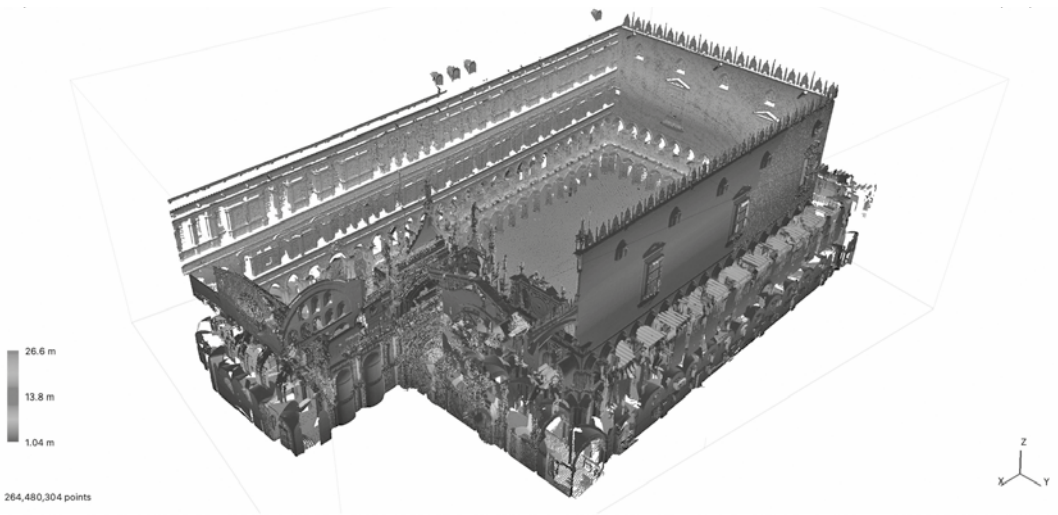


FIGURA 02

Rilievo laser scanner 3D delle superfici del Palazzo Ducale, Venezia.
L. Benvenuti, 2025.

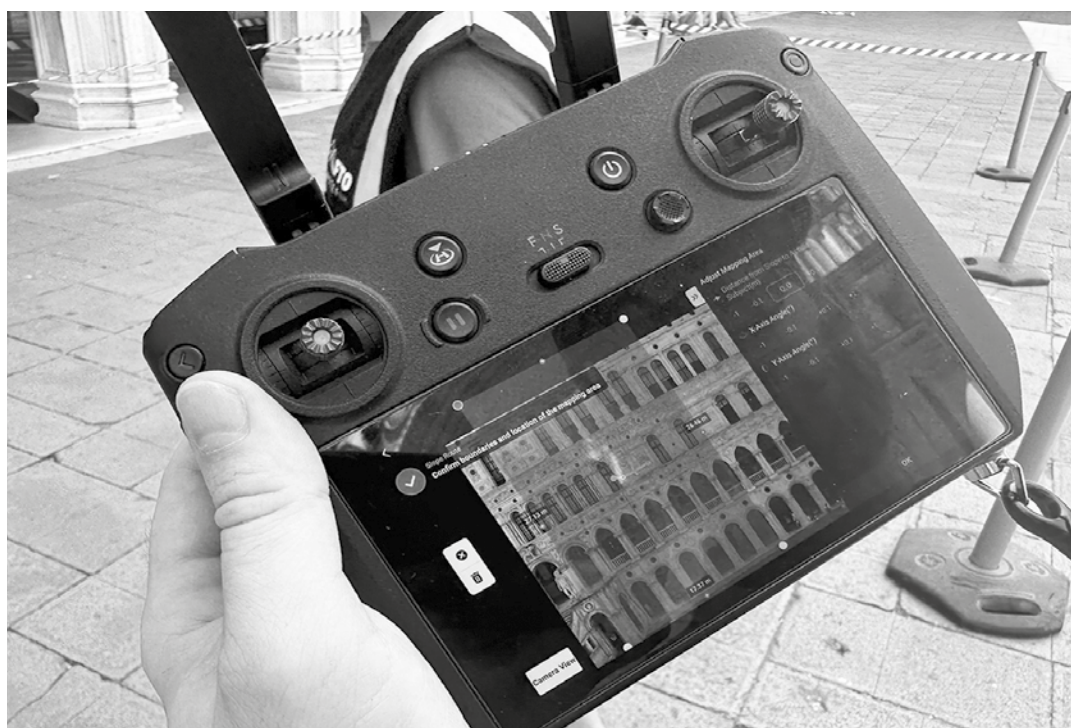


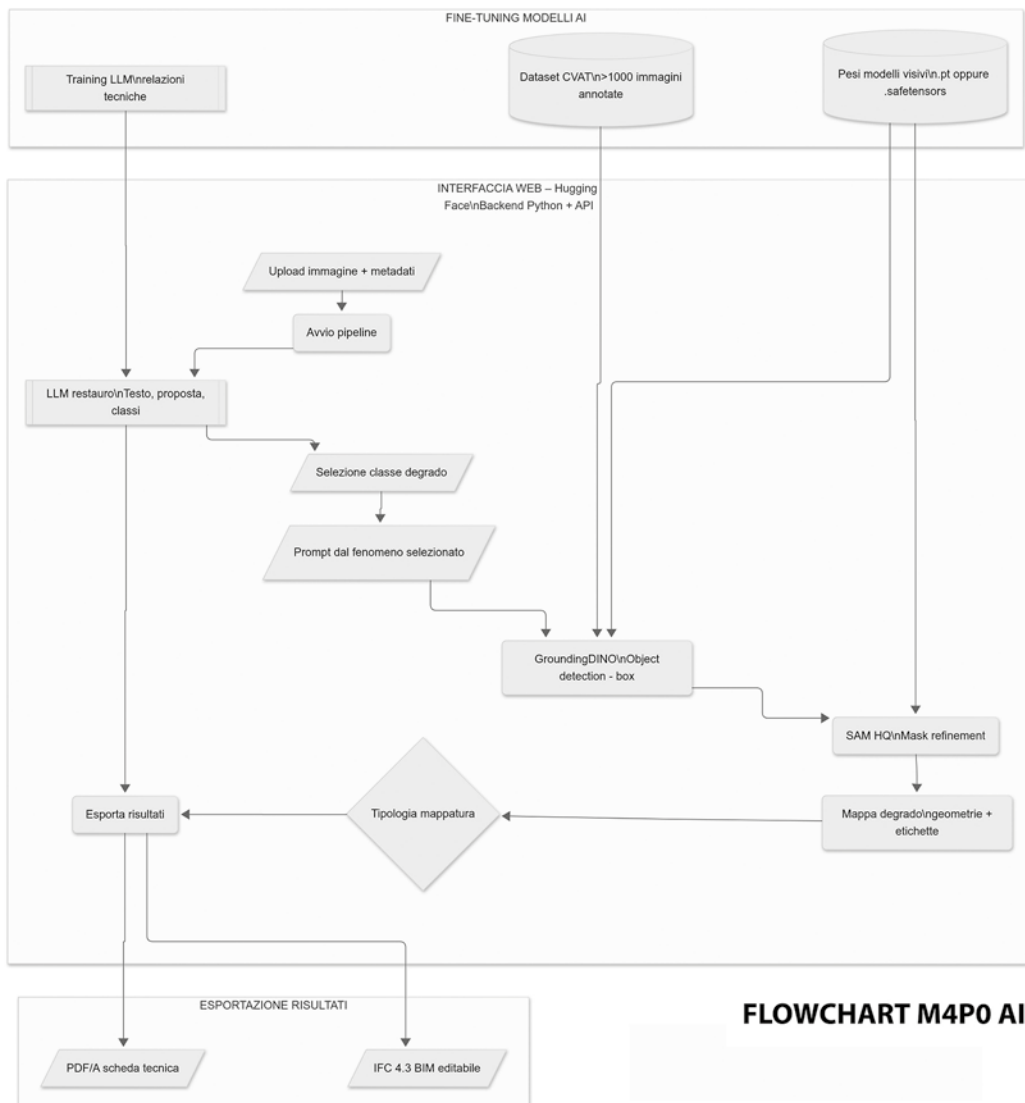
FIGURA 03

Rilievo fotogrammetrico e ispezione termografica con drone del Palazzo Ducale, Venezia.
L. Benvenuti, 2025.



FIGURA 04

Indagini visive dirette e mappatura delle forme di degrado mediante restauratori su fune.
L. Benvenuti, 2025.



Analisi dello stato di fatto

Classe degrado rilevata: Lesione
 Affinità classe di degrado: 0.51

Pilastro lapideo in pietra d'Istria con lesione orizzontale passante di probabile natura strutturale, estesa all'intera sezione. Presenza diffusa di cavillature superficiali, con piccole mancanze puntuali lungo i bordi modanati. Superficie interessata da leggera presenza di depositi superficiali incoerenti

Proposta di intervento

Rimozione dei depositi superficiali incoerenti a secco e successivo lavaggio con acqua a bassa pressione. Consolidamento della lesione mediante iniezioni di malta fluida consolidante, con eventuale impermeatura in caso di distacco strutturale. Stuccatura della lesione principale e delle cavillature diffuse con malta compatibile. Applicazione di protettivo finale idoneo alla pietra d'Istria.

Documentazione generata automaticamente dal modello AI M4PO.
 Tempi elaborazione processi
 LLM process: 10.12 sec
 BOX process: 43.55 sec

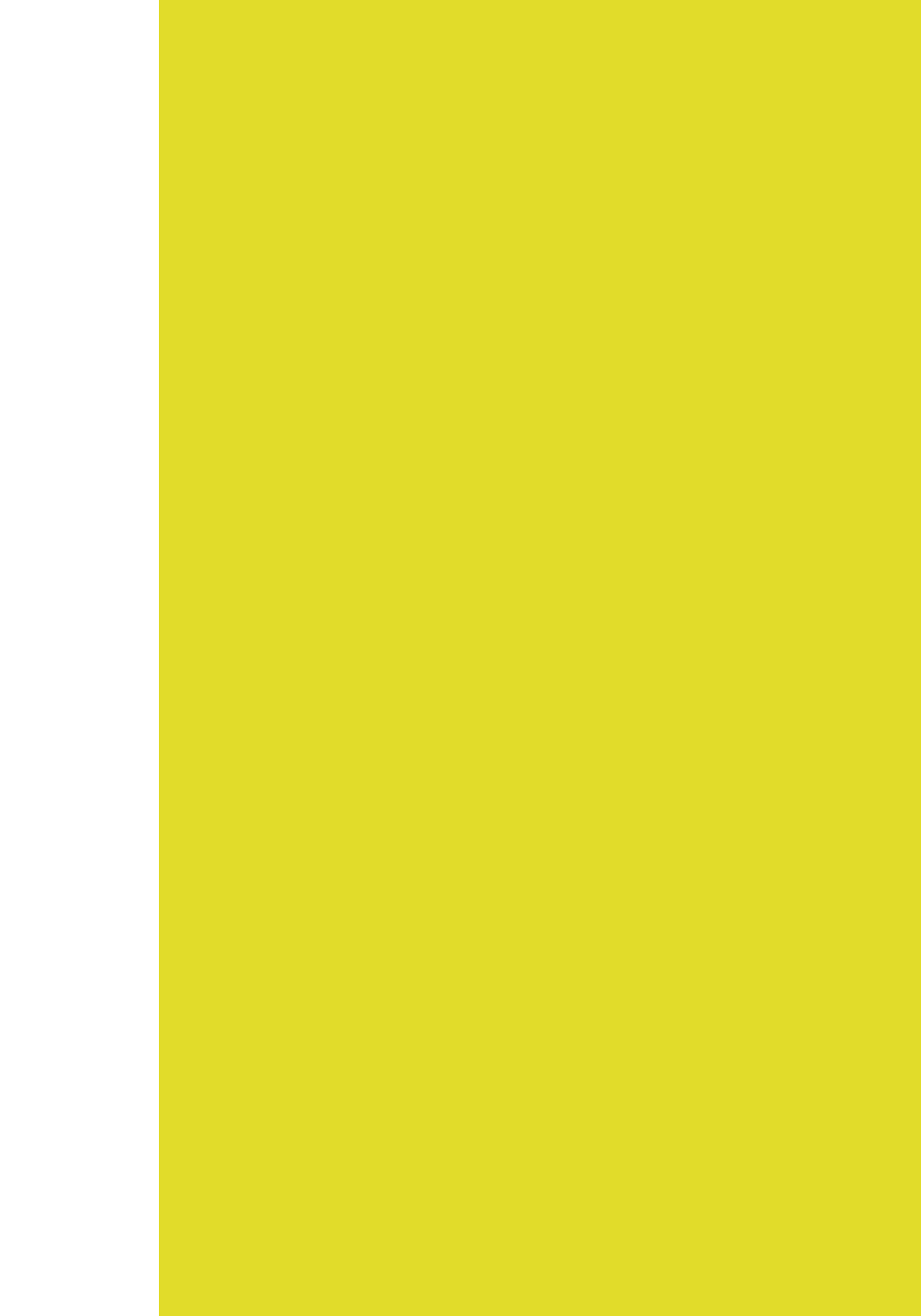
I dati e le valutazioni devono essere verificati da un tecnico qualificato.

FIGURA 05

Flowchart del modello IA e output automatizzato per il supporto alla mappatura, allo stato di fatto e alla proposta operativa.
 L. Benvenuti, 2025.



novembre 2025
Anteferma Open Books



Volume 3

Spoke 4
City, Architecture,
Sustainable design

A cura di

Pierpaolo Campostrini
Sara Di Resta
Paolo Faccio
Laura Rappa
Enrico Rinaldi

Il volume dello Spoke 4 “Città, Architettura e Design Sostenibile” – RT2 – Attività “Heritage, recovery, conservation” racchiude i risultati del progetto iNEST nell’ambito della conservazione e della mitigazione del rischio del patrimonio culturale in rapporto alle sfide legate alla sostenibilità. Il gruppo di ricerca è composto dall’Università Iuav di Venezia, da CORILA – Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia, dall’Università degli Studi di Udine, dall’Università degli studi di Trieste e dall’Università degli Studi di Padova, con il supporto di Co.New Tech. Srl, azienda vincitrice dalla prima tornata dei bandi a cascata. In questa pubblicazione trovano spazio anche gli esiti di lavori condotti da gruppi di ricerca afferenti ad enti ed istituzioni del territorio nazionale e internazionale quali ‘Alma Mater Studiorum’ Università di Bologna, CNR Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze dell’Atmosfera e del Clima, Fondazione LINKS, Politecnico di Torino, Fondazione PIN, Università Ca’ Foscari di Venezia, Università di Bari Aldo Moro, Università di Perugia, IIT Istituto Italiano di Tecnologia e UPV Universitat Politècnica de València, con cui il coordinamento dell’Attività “Heritage, recovery, conservation” ha stretto collaborazioni e supportato scambi al fine di arricchire conoscenze e scenari che interessano la transizione verde nella conservazione e nella gestione del patrimonio culturale.