TRAIETTORIA 7. TECNOLOGIE PER IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI PROVOCATI DA FATTORI NATURALI E ANTROPICI SUI BENI CULTURALI

GRUPPO DI ESPERTI

Esperti:	***Enti:***
Prof. Stefano Aversa (coordinatore)	*Università degli Studi di Napoli "Parthenope"*
Prof. Giuseppe Ciraolo	*Università degli Studi di Palermo*
Prof. Gianmarco De Felice	*Università degli Studi "Roma 3"*
Dr. Andrea Giannantoni	*Università degli Studi di Ferrara*
Prof.ssa Maura Imbimbo	*Università degli Studi di Cassino e del Lazio meridionale*
Prof. Stefano Lenci	*Università Politecnica delle Marche*
Prof. Gian Piero Lignola	*Università degli Studi di Napoli "Federico II"*
Prof. Paolo Mazzoleni	*Università degli Studi di Catania*
Ing. Maria Luisa Mongelli	*ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile*
Dr. Marco Nervo	*Centro per la conservazione ed il restauro dei Beni Culturali "La Venaria Reale"*
Ing. Carmine Pascale	*STRESS S.c.ar.l.*

Il principale obiettivo della *Traiettoria 7* è quello di creare un aggregato di competenze in ambito nazionale, che veda la partecipazione del sistema industriale, di quello della ricerca e della pubblica amministrazione nazionale e regionale, per dare luogo a un percorso (*roadmap*) di sviluppo tecnologico condiviso nello specifico settore del monitoraggio del rischio cui è sottoposto il rilevante patrimonio del nostro paese, derivante da eventi naturali (sisma, frane, inondazioni, ecc.) o dall'azione dell'uomo.

Tale roadmap dovrà definire lo sviluppo e l'applicazione di tecnologie per la valutazione del comportamento del patrimonio culturale del nostro territorio nazionale, monitorando il suo stato di salute e la sua evoluzione rispetto ad eventi naturali ed antropici, con l'obiettivo finale di fornire quegli strumenti di supporto per le scelte e le attività rivolte alla sua conservazione e recupero.

Su tale tema, anche per la peculiare compresenza in Italia di un patrimonio culturale che non ha pari con altri Paesi e la significativa pericolosità legata a diversi fenomeni naturali, su cui si tornerà più avanti, le attività condotte nel mondo dell'università e degli altri centri di ricerca, e quelle sviluppate nell'ambito industriale rappresentano certamente delle eccellenze, che collocano il nostro Paese tra quelli all'avanguardia nel settore. Manca, però, una chiara condivisione di un programma di ricerca, che

coinvolga tutti i potenziali interlocutori, pubblici e privati, capace di far crescere ulteriormente le attività nel settore, con potenziali opportunità di sviluppo tecnologico e innovativo per il sistema industriale. Appare, quindi, necessario rendere lo scenario delle competenze nazionali sul tema sistemico e in sinergia con le esigenze dello sviluppo industriale e tecnologico del paese, obiettivo che diventa centrale nello sviluppo del piano strategico di tale Traiettoria.
Prima di entrare nella definizione di tale piano strategico e delle sotto-traiettorie in cui sarà articolata la Traiettoria, è necessario premettere alcune considerazioni di carattere generale, che serviranno a fare comprendere i presupposti teorici della tematica, nonché l'ampiezza e i limiti del campo di intervento della presente Traiettoria, mostrando – in particolare – che il Monitoraggio è parte fondamentale della mitigazione del Rischio per il patrimonio culturale, soprattutto se viene condotto un con approccio culturalmente e scientificamente corretto, utilizzando oculatamente gli strumenti che sono forniti dallo sviluppo tecnologico.
Trattando di monitoraggio del Rischio per il patrimonio culturale, appare innanzitutto necessario definirlo in modo rigoroso dal punto di vista scientifico. È ben noto, in ambito scientifico, che il Rischio, R, sia esprimibile come prodotto tra Pericolosità, P, Esposizione, E, e Vulnerabilità, V:

R = P * V * E

La pericolosità, **P**, è a sua volta definita come probabilità di accadimento di un evento caratterizzato da intensità maggiore o uguale a una fissata come soglia, in un certo sito e in un determinato tempo di riferimento; la vulnerabilità, **V**, rappresenta la propensione dell'oggetto di interesse (nel caso specifico, il bene culturale o parte di esso) a subire danneggiamenti in conseguenza delle sollecitazioni indotte da un evento di una certa intensità; l'Esposizione, **E**, indica il valore del bene esposto. Quest'ultimo può comprendere sia il bene materiale sia le persone che possono essere coinvolte.
A seconda della tipologia di Rischio, è possibile operare su uno o più dei termini presenti per la sua mitigazione entro soglie che il decisore politico riterrà opportune. Il monitoraggio, come si vedrà più avanti, è spesso parte integrante di un razionale progetto di mitigazione del rischio e assume particolare valenza in tutti quei casi, come quelli che interessano il patrimonio culturale, nei quali tale progetto di mitigazione deve confrontarsi anche con una indiscutibile esigenza di conservazione del valore iconico e materico del bene da proteggere.
In secondo luogo, conviene definire le diverse tipologie di Rischio cui può essere sottoposto il patrimonio culturale e, nel caso di rischi da eventi naturali, mostrare come la relativa Pericolosità sia diffusa sul territorio nazionale. Utilizzando la suddivisione dei Rischi operata dal Dipartimento della Protezione Civile nella definizione delle competenze della Commissione Grandi Rischi, questi si possono dividere in:

Rischio sismico
Rischio vulcanico
Rischio da frana
Rischio idraulico (alluvioni, maremoto, ecc.)
Rischio industriale
Rischio ambientale e degli incendi boschivi.

A questi Rischi se ne devono aggiungere altri, come quello legato alla subsidenza, sia che sia prodotta dal prelievo da acquiferi sotterranei sia che sia legata alla presenza di cavità.
Infine, si deve considerare il Rischio specifico del Patrimonio culturale anche alla scala degli oggetti e del contenuto legato all'esposizione dello stesso e all'interazione con chi interagisce con esso (visitatori, operatori, ecc.). Questo è particolarmente significativo per i beni archeologici, ma anche per gli affreschi e per tante altre situazioni dove il rischio può essere diverso, spesso più marcato, rispetto all'oggetto che lo contiene.
Nel nostro paese, in ogni caso, le aree interessate da pericolosità sismica, frane e alluvioni coprono quasi tutto il territorio nazionale e, quindi, investono potenzialmente la quasi totalità del patrimonio culturale italiano.
Il Monitoraggio assume una valenza particolare nella mitigazione del Rischio con una triplice valenza:
a) innanzitutto, insieme con altre metodologie di indagine, con il rilievo e con l'acquisizione di informazioni storiche, architettoniche e archeologiche costituisce uno strumento essenziale per la conoscenza dello stato di un bene culturale e, in particolar modo, dell'evoluzione delle sue condizioni nel tempo;
b) in secondo luogo, il monitoraggio può costituire la base per la protezione del patrimonio culturale con il cosiddetto *early-warning*, che consiste nel tenere sotto controllo la "sorgente" del pericolo e di preavvisare per adottare opportuni rimedi in tempi brevi e compatibili con l'evoluzione del fenomeno;
c) in terzo luogo, il monitoraggio può essere uno strumento per verificare la validità degli interventi di mitigazione del rischio o di consolidamento strutturale, soprattutto quando – per evitare interventi molto invasivi – si scelga di procedere con un approccio osservazionale, che è ben codificato nel campo della Geotecnica ma che può essere esteso anche ad altri ambiti.
Inoltre, un accurato monitoraggio, soprattutto nel caso in cui esso sia esteso su area vasta e, nel caso in cui sia corredato da una chiara interpretazione su base scientifico-tecnica, può configurarsi come uno strumento utile per l'allocazione di risorse pubbliche e private. In alcuni casi può anche avere un valore sociale in quanto, in determinate circostanze, gli esiti del monitoraggio possono estendersi anche al costruito ordinario che si trovi nelle vicinanze del bene culturale monitorato.
Il progresso enorme nello sviluppo tecnologico degli strumenti di misura e l'ancóra maggiore sviluppo nel campo dell'informatica hanno, attualmente, reso possibili applicazioni di monitoraggio prima impensabili e ne hanno esteso, quindi, il campo

di applicazione. Tale sviluppo non consente però di predisporre sistemi di monitoraggio senza un'adeguata consapevolezza del fenomeno. Infatti, indipendentemente dal tipo di strumentazione adoperata e dal problema in esame, il monitoraggio deve essere condotto sulla scorta di un adeguato progetto, che deve necessariamente prevedere una fase di analisi e di studio preventivo per comprendere il fenomeno eventualmente in atto e la possibile velocità della sua evoluzione, oltre che per definire dei valori soglia che possano fornire allertamenti tempestivi al decisore. Solo la conoscenza preventiva del problema permette di inserire i dati ottenuti dal monitoraggio in una modellazione a posteriori che possa consentire di comprendere l'evoluzione in senso quantitativo dei fenomeni in atto. Spesso, purtroppo, il monitoraggio è predisposto senza la necessaria fase di studio preventivo e senza *una back-analysis* dei risultati, che serve anche a definire sempre meglio la problematica in atto.
In tal senso, l'innovatività del monitoraggio non riguarda eclusivamente l'acquisizione dei dati in quanto tali, ma l'intero processo ovvero la sua applicazione "intelligente" e consapevole alla problematica.
Nella progettazione del Monitoraggio deve essere anche tenuta in conto la necessità di ridondanza delle misure e dell'opportunità di procedere con tecnologie differenti.
Appare importante differenziare l'approccio al Monitoraggio sulla base dell'estensione del problema in esame, atteso che alle diverse scale sono spesse utilizzate tecnologie e strumentazioni diverse, anche se basate sugli stessi principi funzionali.
Nella presente Traiettoria, si è deciso, quindi, di operare una suddivisione tenendo conto di tale indicatore, e suddividendo la traiettoria stessa nelle seguenti sotto-traiettorie:

- *Monitoraggio su area vasta;*
- *Monitoraggio alla scala della singola costruzione o della singola situazione naturale;*
- *Monitoraggio alla scala del contenuto del bene o del dettaglio.*

Tale suddivisione prescinde dal rischio in esame, essendo gli strumenti e le tecniche di monitoraggio, in numerosi casi, simili o accomunabili.

DEFINIZIONE SOTTO-TRAIETTORIE

7.1. Monitoraggio su area vasta

In Italia esistono ampie realtà territoriali che necessitano di un attento studio quantitativo delle loro condizioni e del Rischio cui sono soggette essenzialmente per eventi naturali. La tipologia di monitoraggio da utilizzare in tali situazioni deve necessariamente prevedere un approccio "macro", caratterizzato da una maggiore attenzione all'ambito territoriale piuttosto che al singolo manufatto o alla singola situazione naturale.

7.2. Monitoraggio alla scala della singola costruzione o della singola situazione naturale

L'approccio al monitoraggio alla scala della singola costruzione o della situazione naturale richiede un approccio differente rispetto a quella precedentemente descritta. Il focus centrale di questa sottotraiettoria è quello di fornire delle metodologie per la conoscenza e la valutazione del comportamento della singola costruzione o della singola situazione naturale che può essere considerata parte del patrimonio culturale, monitorando il suo stato di salute e la sua evoluzione nel tempo. Il monitoraggio può, e spesso deve, interessare non solo la costruzione ma anche la sorgente con cui interagisce come ad esempio il sottosuolo, le sorgenti antropiche come il traffico, ecc.

7.3. Monitoraggio alla scala del contenuto o del dettaglio

Le alterazioni osservabili su un'opera d'arte sono bene note e codificate, così come le cause di tali alterazioni. Più complesso è invece attribuire una chiara corrispondenza tra causa ed effetto, poiché questo presuppone non solo una corretta lettura delle alterazioni osservabili sul bene ma anche un puntuale monitoraggio di tutti quei parametri che possono essere causa di alterazione. Il focus centrale di questa sottotraiettoria è quello di fornire strumenti di monitoraggio delle alterazioni e delle cause e di permetterne una chiara e possibilmente univoca corrispondenza causa-effetto, aspetto che garantirebbe un corretto approccio di risk assessment per una successiva pianificazione delle azioni di mitigazione dei rischi.

7.1. MONITORAGGIO SU AREA VASTA

In Italia esistono ampie realtà territoriali (ad esempio, agglomerati urbani, anche di notevole estensione, come i centri storici di tante delle nostre città o interi paesini, o realtà naturali di particolare valore paesaggistico) che necessitano di un attento studio quantitativo delle loro condizioni e del Rischio a cui sono soggette essenzialmente per eventi naturali.

È ben nota la predisposizione di vaste aree del territorio nazionale ad una serie di rischi di origine naturale o antropica. Le tecnologie di monitoraggio a diverse scale risultano essenziali per la comprensione delle dinamiche spazio-temporali di tali fenomeni.

L'obiettivo principale di questa sotto-traiettoria è quello di descrivere sinteticamente quali sono le tecniche più avanzare di monitoraggio del territorio che contiene il bene culturale. È, infatti, molto chiaro che una caratterizzazione dello stato del singolo monumento risulta poco efficace se non relazionato ai rischi che possono provenire dal territorio circostante.

È evidente che le tradizionali tecniche puntuali di monitoraggio, per quanto precise non possono fornire informazioni di carattere sinottico.

La tipologia di monitoraggio da utilizzare in tali situazioni deve necessariamente

prevedere un approccio “macro”, caratterizzato da una maggiore attenzione all’ambito territoriale piuttosto che al singolo manufatto o alla singola situazione naturale. Ad integrazione delle tecnologie tradizionali, oggi è possibile fruire anche delle tecnologie a distanza che comprendono anche i risultati ottenuti nel settore aerospaziale dell'osservazione a distanza della terra (*remote sensing, earth observation*), quali l’interferometria SAR satellitare, LiDAR, vibrometria laser a scansione, fotogrammetria digitale, le tecniche di imaging multispettrale e iperspettrale, ecc.) per la misura degli spostamenti superficiali del territorio o al monitoraggio di fenomeni che possono avere effetto a distanza (early-warning). In questo contesto va ricordato il Programma Europeo di osservazione della Terra Copernicus, che mette a disposizione informazioni da molteplici fonti, ossia satelliti di osservazione della Terra e sensori di terra, di mare ed aviotrasportati, e ha tra i suoi obiettivi quello di supportare le necessità delle politiche pubbliche europee attraverso la fornitura di servizi precisi ed affidabili.
Ad integrazione delle tecniche fotogrammetriche tradizionali, le tecnologie digitali consentono la restituzione 3D da immagini digitali 2D, delle aree prese in esame, e, mediante la definizione di modelli numerici scalati sulla base delle misure reali, sono di supporto sia al controllo del territorio su larga scala sia al monitoraggio conservativo del patrimonio storico, delle opere d’arte e del paesaggio in esso contenuti.
Scopo della sotto-traiettoria 7.1 è quello di mettere in evidenza queste tecniche in relazione ai vari rischi provenienti dal territorio. Si ribadisce, comunque, la necessità di interazione con le tecniche di monitoraggio puntuali dei singoli elementi (edifici, monumenti, ecc).

La sotto-traiettoria 7.1 prevede in sintesi di affrontare i seguenti punti:

- Evidenziare la disponibilità di dati utili per il monitoraggio su area vasta;
- Descrivere sinteticamente le tecnologie disponibili;
- Descrivere l’eventuale presenza di gap di conoscenza da colmare;
- Indicare l’interazione tra tecnologie diverse ma concorrenti allo scopo del monitoraggio;
- Indicare alcuni esempi virtuosi di applicazione.

Si possono individuare, a titolo di esempio e senza la pretesa di esaustività, le seguenti tecnologie:

- Telerilevamento radar satellitare (interferometria differenziale, tecnica dei permanent scatters), particolarmente idonee per lo studio delle deformazioni superficiali del suolo dovute a diverse cause: terremoti, frane, subsidenza e deformazioni di infrastrutture, quali dighe, argini, edifici e assi viari.

- Telerilevamento radar satellitare per la mappatura delle aree allagate a seguito di eventi estremi. Questa ultima tecnologia risulta particolarmente efficace, data la grande disponibilità di immagini ad alta risoluzione spaziale e temporale (ad esempio, Sentinel 1) e la relativa insensibilità alla presenza di corpi nuvolosi, pioggia, ecc;
- Telerilevamento satellitare per il monitoraggio delle aree incendiate e per l'individuazione delle aree soggette a rischio incendio. Le tecniche di telerilevamento satellitare si prestano particolarmente alla individuazione di aree vegetate in condizioni di stress idrico, e quindi particolarmente predisposte agli incendi. È ovvio che il dato va incrociato con dati meteo e morfologici del territorio. Anche in questo caso il programma Copernicus (Emergency Management Service) fornisce prodotti utilizzabili in tal senso (si veda il portale EFFIS);
- Telerilevamento radar terrestre, particolarmente idoneo per lo studio delle deformazioni di strutture e infrastrutture. Viene utilizzato sia in campo di rischio frana e rischio vulcanico, sia per la stima precisa degli spostamenti di strutture (interferometria terrestre);

- Rilevamento LiDAR: la sequenza di rilievi LiDAR permette di valutare l'evoluzione delle condizioni di ambiti territoriali estesi. Generalmente le applicazioni più diffuse fanno uso di laser a doppia frequenza installati su piattaforma aerea (airborne remote sensing).

- Rilevamento aerofotogrammetrico via drone: mediante la definizione di modelli 3D digitali, sotto forma di nuvole di punti e curve di livello, consente di ottenere un rilievo speditivo ed economico, di buona precisione in termini di dati metrici, utile ai fini del monitoraggio del cambiamento del territorio. Si pensi alle possibili applicazioni realizzate per la messa in sicurezza delle zone colpite dai sismi, per il censimento e classificazione delle macerie post terremoto, per il monitoraggio delle aree a rischio da frana o da inondazioni. Risulta molto utile per il monitoraggio pre- e post evento. Si tratta di un campo in fortissima evoluzione, sia dal punto di vista tecnologico (sensoristica miniaturizzata) sia da quello normativo.

- Rilevamento termografico da drone: si utilizzano termocamere miniaturizzate e tali da permettere un rilievo ad alta risoluzione. Lo scopo è quello di individuare anomalie termiche nel territorio e/o nel monumento che si intende analizzare;

- Monitoraggio per applicazioni early warning: si tratta di tecniche differenziate, caratterizzate dalla necessità di processamento rapido delle misure (generalmente provenienti da sensori distribuiti sul territorio), se confrontato con l'evoluzione del fenomeno: in tempo reale per rischio

sismico, più lento per rischio vulcanico, alluvioni o maremoti, dipendente dalla velocità della fase parossistica dell'evento nel caso di rischio frana.

- *Remote sensing* distribuito mediante sensori in fibra ottica o sensori di diversa natura.

Nell'ambito di tale sottotraiettoria risulta evidente, inoltre, l'interazione con le traiettorie 1, 4 e 5 del Cluster TICHE.

Il monitoraggio da misure e immagini da satellite, da aereo, da drone e tramite reti di sensori a terra su vasta scala è in stretta sinergia con la sotto traiettoria 5: consente di identificare le aree a rischio, di ottenere dettagliate mappature nello spazio e nel tempo e, conseguentemente, focalizzare l'attenzione sui beni interessati e maggiormente esposti ad un possibile danneggiamento. La possibilità di avere a disposizione serie temporali di dati consente di potere seguire la dinamica dei fenomeni e di valutare situazioni di danneggiamento incipiente. Negli ultimi anni sono stati implementati una serie di portali web da cui è possibile accedere a dati grezzi o elaborati a diversi livelli. A livello europeo le maggiori fonti di informazioni e di dati sono costituite dal programma *Sentinel* e dal programma *Copernicus*. È chiaro che deve essere, anche, disponibile la conoscenza sul patrimonio culturale e sul suo stato. Questa conoscenza deve essere disponibile in formato digitale e geo-referenziato per permettere l'integrazione efficace delle informazioni.

Da una analisi approfondita della bibliografia (vedi in seguito), molto spesso la stima del *geo-hazard* per il *cultural heritage* viene effettuato a valle di un evento catastrofico. La stima della vulnerabilità di lungo termine di un sito o un monumento è di solito focalizzato sul sito stesso come risposta a un rischio ambientale. Pochi studi fanno riferimento a parametri di aree più ampie, considerando le dinamiche geologiche, geotecniche e geofisiche del sito e delle zone in prossimità. È stato largamente riconosciuto che il patrimonio culturale è particolarmente vulnerabile ai disastri indotti da terremoti, inondazioni, grandi frane, ecc. Va detto che anche altri fenomeni lenti, come i movimenti di subsidenza oppure frane lente ma progressive, possono danneggiare seriamente i monumenti (Rohn et al, 2005; Canuti et al, 2009)
La sfida a livello nazionale e internazionale su questo campo riguarda lo sviluppo di prodotti su misura che consentano il monitoraggio di vaste aree e la valutazione dei rischi.
Diversi progetti H2020 stanno cercando di dare una risposta sostenibile alla necessità di monitorare in modo efficace e a basso costo il patrimonio culturale. Alcuni di questi progetti sono riportati nella lista dei progetti. Tra questi, il progetto PROTHEGO (*PROTection of European Cultural HEritage from GeO-hazards* - http://www.prothego.eu/downloads.html) ha come obiettivo quello di fornire un contributo innovativo attraverso l'analisi dei geo-rischi in tutte le aree del patrimonio culturale europeo. Il progetto applica le tecnologie del telerilevamento basate

sull'interferometria radar (InSAR) per monitorare monumenti e siti in Europa potenzialmente a rischio a causa di geo-rischi. Le informazioni telerilevate sulla stabilità del terreno e sul movimento sono combinate con i set di geohazard-dati disponibili per identificare i siti più a rischio in tutta Europa. È interessante evidenziare che tale progetto affronta il problema dei rischi del patrimonio culturale anche in relazione ai cambiamenti climatici. Per quanto riguarda il rischio legato agli allagamenti, ad esempio, appare interessante l'applicazione di un approccio modellistico di trasformazione afflussi/deflussi per la delimitazione delle aree allagabili, sotto vari scenari di cambiamento climatico che si possono realizzare nei prossimi 20 anni. Lo stesso progetto evidenzia l'importanza di una caratterizzazione geologico/geotecnica del territorio, basata su metodi di classificazione del territorio in termini di suscettibilità del terreno al geo-hazard, oltre che della necessità di costruire un database del patrimonio culturale che si il più completo e dettagliato possibile. Ciò al fine di stimare correttamente la vulnerabilità e, infine, il rischio.
Risulta evidente la necessità della costituzione di un geo-database da incrociare con un database che descriva in dettaglio le caratteristiche del patrimonio culturale (su base SIT/GIS).
In questo contesto anche il Sistema di Supporto alle Decisioni –CIPCast con finalità operative e di simulazione, è stato concepito come piattaforma per la sicurezza delle Infrastrutture Critiche (CI), per l'analisi e la previsione del rischio a fronte di diversi tipi di eventi naturali estremi (terremoti, precipitazioni intense, etc.) in grado di calcolare gli impatti sul territorio e le opere (strutturali e d'arte) una volta che siano noti parametri necessari alla stima della loro vulnerabilità "specifica". Esso, quindi, rappresenta uno strumento avanzato per fornire supporto sia agli operatori delle Reti di CI sia alla Pubblica Amministrazione, responsabile per le azioni di previsione e gestione delle emergenze.
Nato dall'esigenza di affrontare eventi meteorologici sempre più frequenti, severi e caratterizzati da maggior pericolosità in un contesto urbano, il software CIPCast integra dati geospaziali, previsioni meteo fino a un'ora (nowcasting) e a breve-medio termine con informazioni sull'assetto idrogeologico e sulla ricorrenza di eventi sismici e di altri eventi naturali di rilievo.
Nel complesso, consente di effettuare una valutazione degli impatti sul sistema integrato delle CI e stimare le eventuali conseguenze, sia partendo da dati di contesto reali, sia attraverso la predisposizione di scenari simulati. Tramite il modulo CIPCast-ES è possibile effettuare la simulazione di terremoti e stimare il danneggiamento dell'edificato e delle CI, utilizzando, al momento "shakemaps" prodotte da INGV e modelli semplificati per caratterizzare la risposta sismica del costruito.
È chiaro che gli alti costi di gestione e mantenimento del patrimonio culturale spingono verso l'adozione di politiche sempre più efficaci di monitoraggio al fine di garantire una azione sostenibile di conservazione del bene stesso. In questo contesto il rilevamento delle deformazioni della struttura e del territorio circostante appare di fondamentale importanza.
Il monitoraggio classico, basato sull'installazione di sistemi permanenti in prossimità

o a contatto con il monumento, per quanto molto preciso soffre di diverse problematiche legate ai costi in termini di tempo e sforzo economico, specialmente se ci si occupa di patrimonio culturale localizzato in aree remote. È inoltre evidente che il solo monitoraggio locale rischia di non descrivere le dinamiche delle zone circostanti e quindi di non comprendere l'evoluzione spazio-temporale di fenomeni che possono interessare il monumento oggetto di attenzione. Dalla analisi della letteratura risulta evidente che la strategia migliore è quella che integra monitoraggi locali effettuati con tecniche tradizionali o avanzate (GNSS, inclinometri, sensori elettrici, radar differenziale terrestre, tecniche di rilevamento da drone, laser scanning terrestre, ecc) con il monitoraggio su area vasta effettuata mediante acquisizioni satellitari (Zhou et al, 2015).
Tra le tecniche satellitari, quella che risulta di più comune applicazione è la tecnica interferometrica differenziale, la cui applicazione nel monitoraggio delle deformazioni superficiali del territorio è oramai entrata in una fase operational. Certamente esistono una serie di limitazioni da tale tecnica, soprattutto legate alla disponibilità di un dataset opportuno di immagini SAR.
Tuttavia, la recente incrementata disponibilità di immagini con queste caratteristiche garantisce una buona possibilità di stima delle deformazioni su vaste aree. Va detto che proprio per superare alcune limitazioni legate alla coerenza delle immagini SAR, recentemente è stata sviluppata la tecnica dei permanent scatter points che, anche se non in modo spazialmente continuo sul territorio, è capace di restituire la serie temporale degli spostamenti in punti opportunamente individuati nel territorio (https://site.tre-altamira.com/).
È verosimile credere che nell'ottica dello sviluppo dell'IoT, l'impatto sulla prevenzione e la gestione dei post eventi debba essere misurato grazie all'uso integrato di sensori, big data e rete.
Grazie ai dati raccolti da numerosi sensori posizionati in alcune stazioni a terra, congiuntamente a quelli satellitari, è oggi possibile elaborare una serie di informazioni in tempo reale producendo mappe dettagliate che identificano con estrema precisione le aree colpite.

Per la sicurezza del territorio, sono, inoltre sempre più diffusi sistemi di sensori distribuiti e data logger con il controllo remoto ed il trasferimento dati in modalità wireless per il monitoraggio in continuo di edifici, monumenti e infrastrutture critiche, così come l'insorgenza di instabilità del terreno, fiumi e laghi ecc.
Tra queste, le reti di sensori accelerometrici a tecnologia MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) a basso costo e alta densità di punti di misura, trovano negli ultimi anni notevole applicazione. Tali sensori comunicano in modalità wireless con un'unità di elaborazione e un sistema di trasmissione dati e funzionano da inclinometri; pertanto se resi solidali ad un elemento rigido consentono di monitorare l'inclinazione dell'elemento stesso. La variazione nel tempo di questa grandezza è quindi rappresentativa della cinematica del movimento di una struttura e dell'eventuale suo cambiamento nel tempo.

Molti studi sono inoltre dedicati all'installazione di sensori distribuiti che si appoggino su reti dedicate, evitando l'utilizzo dei ponti radio Gprs e dei segnali Gps a rischio di congestione in situazioni critiche, ed eventi estremi, in modo che siano del tutto autonomi dal punto di vista energetico, e quindi slegati dalle reti elettriche tradizionali e dalla loro vulnerabilità in caso di catastrofe ambientale.
Sistemi di questo tipo sono ovviamente facilmente scalabili al monitoraggio dei beni culturali e paesaggistici presenti sul territorio. Un progetto di questo tipo, di tipo sperimentale, è stato avviato nel Comune di Borca di Cadore (piano comunale di protezione Civile http://cdn1.regione.veneto.it/alfstreaming-servlet/streamer/resourceId/41a6b1d8-ad73-4b58-9e96-58a8670204ab/Piano%20Comunale%20di%20Protezione%20Civile_2015), ed è finalizzato al monitoraggio e allertamento in tempo reale in provincia di Belluno, per il controllo della frana e della colata detritica di Cancia mediante una sensoristica distribuita e una rete di telecomunicazione wireless.

ANALISI DEI PRINCIPALI *STAKEHOLDER*

Il gruppo di esperti sta svolgendo una ricognizione degli attori principali che svolgono attività inerenti a tale traiettoria, ricognizione che rappresenta uno degli obiettivi del presente cluster. Da una prima analisi si riportano i seguenti elenchi che dovranno, pertanto, essere successivamente estesi e completati.

UNIVERSITÀ, EPR, IR, DISTRETTI

Università, Istituti di ricerca leader globali	
Università, Istituti di ricerca *leader* globali e *leader* nazionali	- Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura - Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura - Università di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse - Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica - Università di Catania Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali; Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana" - Università della Calabria Dipartimento di Biologia Ecologia e Scienze della Terra - Università di Bari Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali - Department of Mineralogy and Petrology of the University of Granada (Spain)

	- Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Charles University in Prague, Faculty of Science, Albertov 6, 12843 Prague, Czech Republic - Department of Archaeology, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 35, 9000 - Gent, Belgium - Università di Palermo Dipartimento di Fisica e Chimica e Dipartimento di Ingegneria - Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale - Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria e Dipartimento di Architettura - Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneira Strutturale e Geotecnica
Centri di ricerca:	- ENEA - Dipartimento di Tecnologie Energetiche: - Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche - Laboratorio del Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni, della divisione ICT - Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e Territoriali - Laboratorio delle tecnologie per la DInamica delle Strutture e la PREVenzione del rischio sismico e idrogeologico - Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare - Laboratorio Micro e Nano Strutture per la Fotonica, Divisione di Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute - INFN Sede di Catania - IBAM CNR - CNR - A. Faedo - Pisa (Girardi - Pellegrini)
Distretti	- Centro di Eccellenza del DTC Lazio (www.dtclazio.it) - UNITA' DI RICERCA (https://dtclazio.it/unità -di-ricerca) - UR1: Nuove metodologie, tecnologie e strumenti diagnostici e di analisi per il miglioramento di tecniche di protezione del bene culturale finalizzate alla conservazione e monitoraggio degli artefatti. R1, R6, R8 - UR2: Nuovi materiali, tecnologie, strumenti e dispositivi per il monitoraggio, la conservazione, la protezione e il restauro dei beni culturali. R7, R12 - UR5: Restauro, riqualificazione e valorizzazione di edifici e luoghi vincolati di elevato interesse storico, culturale e paesaggistico, sostenibilità ed efficientamento energetico, qualità dell'ambiente. R5, R9 - Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi S.C.a r.l. - Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM) - Distretto Culturale evoluto Regione Marche (http://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Distretto-Culturale-Evoluto)

	- Distretto ad Alta Tecnologia per le Costruzioni Sostenibili STRESS (www.stress-scarl.com) - Recupero e Valorizzazione del Costruito Storico: - Tecnologie di rilievo e monitoraggio, dalla scala territoriale a quella del singolo edificio; - Tecnologie per la mitigazione dei rischi naturali ed antropici; - Tecnologie per valorizzazione del costruito storico.
Progetti di ricerca di riferimento (*benchmark*), prodotti/servizi realizzati	- ADAMO: Tecnologie di analisi, diagnostica, monitoraggio per la conservazione e il restauro dei beni culturali (http://progettoadamo.enea.it/) Progetto di ricerca finanziato nell'ambito del DTC Lazio; - ECODIGIT ECOsistema DIGITale per la fruizione e la valorizzazione dei beni e delle attivita' culturali della regione Lazio (https://dtclazio.it/progetti-di-ricerca) Progetto di ricerca del DTC Lazio - ARCH Advancing Resilience of historic areas against Climate-related and other Hazards (Horizon 2020 - Grant agreement ID: 820999) - JPI CH (Joint Programming Initiative on Cultural Heritage and Global Change) - HERACLES (HEritage Resilience Against CLimate Events on-Site) – H2020 - PROTHEGO (PROTection of European Cultural HEritage from GeO-hazards) H2020 - HERCULES (Sustainable Futures for Europe's Heritage in Cultural Landscapes) H2020.

IMPRESE

Leader globali e leader nazionali:
- AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica - A.L.I.G. Associazione Laboratori d'Ingegneria E Geotecnica - OICE Associazione nazionale delle società di ingegneria e architettura - Federcostruzioni - ANCE Associazione Nazionale Costruttori Edili

ALTRI PORTATORI DI INTERESSE

- MIBAC
- Musei
- Soprintendenze Archeologiche

PRINCIPALI STRUMENTI DI FINANZIAMENTO

- Linee Horizon 2020;

- ITN-ESPON, ESPON 2020 (European Observatory Network for Territorial Development and Cohesion)
- Med, ENPI Programma ENPI CB MED;
- Cosme, Life, Europa Cultura.

PROCESSO DI TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

- Corsi di Alta Formazione
- Eventi di disseminazione verso gli *stakeholder*
- Eventi di disseminazione verso la popolazione per favorire la conoscenza nell'opinione pubblica delle nuove tecnologie
- Dimostratori tecnologici per l'applicazione delle tecnologie sviluppate
- Corsi di Apprendimento Permanente, *Master*, Seminari, *Workshop*

ANALISI SWOT (*STRENGTHS*, *WEAKNESSES*, *OPPORTUNITIES*, *THREATS*) DELL'AMBITO DI RICERCA E APPLICAZIONE IN ITALIA

Punti di forza	- Presenza di elevati livelli di conoscenza sulle tecnologie di monitoraggio su area vasta - Presenza di un patrimonio culturale distribuito su tutto il territorio	- Presenza di aziende e industrie all'avanguardia nel settore SPAZIO e earth observation - Buona sensibilità della popolazione sui temi della conservazione dei beni culturali
Punti di debolezza	- Scarso livello di cooperazione tra Enti e gruppi di ricerca - Scarsità di figure professionali opportunamente formate sul tema del monitoraggio dei beni culturali in relazione al territorio	- Carenza di studi interdisciplinari - Tematica non ancora riconosciuta come un vero e proprio settore industriale
Opportunità	- Sviluppo di tecnologie specifiche per il monitoraggio su area vasta - Possibilità di sviluppare nuove professionalità	- Diffusione di nuove tecnologie tra gli utenti e i portatori di interesse - Creazione di un repository standard a scala nazionale
Minacce	- Scarsità dei fondi a disposizione - Mancanza di un punto di vista generale e complessivo nelle azioni di monitoraggio	- Ricerche poco integrate o coordinate - Competizione non costruttiva tra Enti e Istituzioni

7.2. MONITORAGGIO ALLA SCALA DELLA SINGOLA COSTRUZIONE O DELLA SINGOLA SITUAZIONE NATURALE

L'assunto di partenza è che il bene culturale costituisce una risorsa non rinnovabile e pertanto la sua conservazione e preservazione dagli eventi estremi è elemento cruciale della storia e della cultura da tramandare alle generazioni future.
Di qui la necessità di sviluppare e implementare tutte le tecnologie di analisi, monitoraggio, previsione, simulazione e mitigazione del rischio dei beni culturali rispetto ad eventi eccezionali naturali e antropici.
Il tema della Protezione dei Beni Culturali è da tempo all'attenzione di istituzioni internazionali a partire dalla Convenzione sulla Protezione del Patrimonio Culturale e Naturale del Pianeta adottata dalla Conferenza Generale dell'UNESCO a Parigi nel 1972, sino al recente *European Framework for Action on Cultural Heritage.*
D'altra parte, gli effetti degli eventi naturali catastrofici sui beni culturali sono all'ordine del giorno. Basti pensare, con riguardo al nostro paese, all'alluvione di Firenze del 1966 o al sisma dell'Aquila del 2009, eventi drammatici che dimostrano la fragilità delle nostre città d'arte ad eventi naturali catastrofici.
L'approccio al monitoraggio alla scala dell'edificio o della situazione naturale richiede un approccio differente rispetto a quello precedentemente descritto. Sebbene alcune delle tecnologie indicate in precedenza possano essere utilizzate, come punto di partenza, alla scala oggetto della presente sotto-traiettoria, in questo caso è necessario fare riferimento anche a misure sull' "oggetto" di interesse.
Il focus centrale di questa sottotraiettoria è quello di fornire delle metodologie per la conoscenza e la valutazione del comportamento della singola costruzione o della singola situazione naturale che può essere considerata parte del patrimonio culturale, monitorando il suo stato di salute e la sua evoluzione nel tempo con l'obiettivo finale di definire dei criteri o delle linee guida che possano indicare (i) la non necessità di intervenire, (ii) la necessità di una semplice manutenzione del manufatto stesso o (iii) la progettazione di interventi o misure di protezione.
Pertanto, la sottotraiettoria deve utilizzare non solo le strumentazioni che, in questo ambito, possono essere sia tradizionali sia innovative, ma deve occuparsi dell'intero processo ovvero dell'analisi preliminare del comportamento del manufatto che consenta la progettazione del sistema di monitoraggio, dei processi di acquisizione a breve o a lungo termine, della combinazione di misure derivanti dall'integrazione di varie strumentazioni, dell'interpretazione dei risultati al fine di una valutazione del suo stato di salute, della definizione di valori soglia che indichino la necessità o meno di intervenire e i livelli di intervento richiesti. L'ausilio della modellazione numerica e dell'analisi strutturale agli elementi finiti costituisce anch'essa uno strumento efficace e di supporto durante le campagne di misura per il monitoraggio conservativo degli edifici storici e delle opere d'arte; si pensi alla definizione di modelli preliminari volti ad individuare le aree critiche di un macroelemento strutturale e i conseguenti punti di misura ai fini del posizionamento della sensoristica, e alla loro successiva calibrazione in termini di condizioni al contorno,

carichi e vincoli, e delle caratteristiche dei materiali mediante i risultati della campagne di acquisizione.
Il monitoraggio può, e spesso deve, interessare non solo la costruzione ma anche la sorgente con cui interagisce come ad esempio il sottosuolo, le sorgenti antropiche come il traffico, ecc. Esistono moltissimi casi in Italia in cui ciò assume particolare rilevanza. Si possono citare al proposito i ben noti casi del monitoraggio della Torre di Pisa, nel quale la subsidenza prodotta nel dopoguerra per l'emungimento da acquiferi profondi nel sottosuolo, nel secondo dopoguerra, accentuò la velocità di rotazione della torre, il caso noto dell'abside del Duomo di Pienza che è soggetto a una frana lenta. Si pensi anche alla rete accelerometrica nazionale che costituisce la base conoscitiva per la definizione dell'azione sismica attesa nelle diverse regioni del nostro paese.
Il degrado dei materiali è un ulteriore problema riguardante la salvaguardia e la conservazione dei beni culturali oltre che la valutazione della loro vulnerabilità con importanti ricadute anche sugli aspetti economici. Il degrado dei materiali investe, infatti, gli aspetti relativi alla loro preservazione sotto vari aspetti financo strutturali. Di conseguenza, in presenza di strutture reali esistenti, il primo passo verso la mitigazione del rischio è la valutazione del livello di degrado associato alla valutazione della capacità strutturale globale effettiva. Parimenti il degrado dei materiali lapidei naturali (rocce) e artificiali (ceramiche, terrecotte, malte e intonaci) utilizzati nelle diverse epoche storiche deve essere monitorato in funzione dei diversi fenomeni, come descritto nel documento NORMAL 1/88, che causano gravi danni alla loro valorizzazione e fruizione. Pertanto, è importante sviluppare modelli per rappresentare il degrado del materiale ottenuto mediante il monitoraggio nella simulazione del comportamento delle strutture e dei materiali. Comprendere il processo di degrado dei materiali è fondamentale per comprendere la vita e resistenza residua e per salvaguardare i beni culturali. L'intervento e la conservazione stessi di strutture esistenti sono una sfida e rappresentano un problema economico e di sicurezza, e devono essere affrontati guardando sia alla performance strutturale sia alle problematiche relative alla durabilità. Il *retrofitting* deve essere pertanto affrontato utilizzando un approccio multidisciplinare (storico-filologico, fisico-chimico mineralogico-petrografico e ingegneristico-strutturale) e la scelta di materiali adeguati. A causa della loro intrinseca natura complessa, questi problemi richiedono un approccio interdisciplinare anche in termini di tecniche di monitoraggio per garantire il *follow-up* dell'intervento e, eventualmente in fase preventiva, per individuare le priorità degli interventi per la pianificazione.

La sottotraiettoria prevede, in sintesi, di affrontare i seguenti punti:

- La promozione della consapevolezza del valore dei beni culturali quali elementi di identità e riconoscibilità delle nostre comunità;

- La previsione (ove possibile) degli eventi naturali (eventi sismici, eventi

atmosferici intensi, eventi franosi) che possono interessare il nostro patrimonio;

- La mappatura dei beni culturali maggiormente a rischio;

- Lo sviluppo di strumenti di controllo non distruttivi e non invasivi per una conoscenza preliminare dello stato di salute delle costruzioni e delle situazioni naturali, classificabili come patrimonio culturale;

- Lo sviluppo di tecniche semplificate per l'analisi della risposta e l'identificazione del danno da effettuarsi con tempi rapidi e bassi costi e, pertanto, implementabili anche su campioni estesi di manufatti (numero ridotto di misurazioni, ecc.);

- Lo sviluppo di tecniche per il monitoraggio e l'identificazione, localizzazione e/o quantificazione del danno più approfondite che interessano manufatti singoli ben individuati e di cui si abbiano a disposizione modelli raffinati per la simulazione della risposta alle azioni attese dalla sorgente;

- Lo sviluppo di tecniche di monitoraggio per l'analisi del degrado dei materiali rispetto alle diverse caratteristiche (fisico-chimico mineralogico-petrografico, strutturale, ecc.);

- Lo sviluppo di tecniche di diagnosi e ispezione volte a verificare lo stato di salute dei beni culturali;

- La definizione di metodologie per la creazione di un database che possa essere rappresentativo del patrimonio oggetto di studio e che fornisca in modo semplice ed efficace alcune fondamentali informazioni sul patrimonio culturale esistente necessarie alla fase conoscitiva e diagnostica dei manufatti stessi (tecnologia GIS);

- Lo sviluppo di Repository per l'archiviazione, la condivisione, la memorizzazione a lungo termine e la messa in sicurezza dei dati sperimentali prodotti da differenti laboratori di ricerca distribuiti geograficamente per favorire la conoscenza integrata, l'analisi e successive elaborazioni;

- Lo sviluppo di specifiche tecniche per la strutturazione di un modello HBIM – Historical Building Information Model, in grado di archiviare tutti i dati relativi agli edifici storici, siano essi relativi al monitoraggio strutturale che ambientale;

- Lo sviluppo di procedure automatizzate e speditive che da immagini digitali

2D possano restituire modelli 3D, scalati sulla base delle misure reali, per la definizione del rilevo geometrico, del quadro fessurativo e il controllo della sua possibile evoluzione nel tempo.

- Lo sviluppo di strumenti di calcolo e di linee guida di supporto agli attori dei processi decisionali nell'ambito delle strategie di prevenzione e di pianificazione delle risorse.

- Lo sviluppo di strategie e metodi speditivi di analisi della vulnerabilità di beni culturali ad eventi estremi quale base conoscitiva per la razionalizzazione delle attività di mitigazione;

- L'integrazione di metodi di rilevamento mediante tecnologie innovative a metodi avanzati di analisi del comportamento strutturale e di stima della risposta del monumento ad eventi estremi;

- Lo sviluppo e l'integrazione di metodi di simulazione quali strumenti di conoscenza e previsione del comportamento di beni culturali ad eventi catastrofici;

- Il recupero e la valorizzazione delle tradizioni e della cultura costruttiva come chiave di protezione del bene culturale ad eventi naturali;

- Lo sviluppo di tecnologie tradizionali e innovative per le fasi di emergenza e di messa in sicurezza del patrimonio al verificarsi di un evento;

- Lo sviluppo di tecnologie tradizionali e innovative per la mitigazione del rischio di perdita del bene culturale, in ottemperanza ai principi di compatibilità reversibilità e durabilità;

- Lo sviluppo di azioni di prevenzione e mitigazione della vulnerabilità per garantire la resilienza dei beni culturali ad eventi catastrofici.

Si possono individuare, a titolo di esempio e senza la pretesa di esaustività, le seguenti tecnologie:

- Tecnologie di monitoraggio e di identificazione strutturale con numero ridotto di misurazioni;
- Tecnologie di analisi e monitoraggio a bassi costi e rapida (facile) implementazione;
- Tecnologie di analisi monitoraggio a breve termine;
- Tecnologie di analisi e monitoraggio a lungo termine;
- Tecnologie di monitoraggio statico e dinamico;

- Tecnologie di monitoraggio mediante sistemi ottici di tipo Motion Capture 3D;
- Tecnologie di monitoraggio a lungo termine mediante FBG;
- Tecnologie non invasive e tecnologie lievemente invasive;
- Tecnologie digitali per la definizione del quadro fessurativo e il calcolo strutturale;
- Tecnologie per il rilevo di dettaglio (Laser Scanner);
- Tecniche Scan-to-BIM per la corretta codifica in ambiente BIM dei dati da rilievo Laser 3D o da fotogrammetria;

Nell'ambito di tale sottotraiettoria risulta inoltre evidente l'interazione con le traiettorie 1, 4, 5 e 6 del *Cluster Tiche*.
Lo stato dell'arte sulla sottotraiettoria 7.2 può essere valutato, alla luce della bibliografia scientifica (vedi in seguito), sulla base di alcune macrocategorie tematiche:

- Prestazioni strutturali del patrimonio culturale, effetti del degrado ed errati interventi del passato;
- Analisi strutturale del patrimonio culturale storico;
- Structural Health Monitoring – SHM;
- Tecniche di monitoraggio per l'analisi del degrado dei materiali rispetto alle diverse caratteristiche.

Prestazioni strutturali del patrimonio culturale, effetti del degrado ed errati interventi del passato

Gli eventi naturali e quelli provocati dall'uomo generano vari rischi alle costruzioni e alle situazioni naturali che fanno parte del patrimonio culturale. Nel caso di eventi naturali, la Banca Mondiale ha riferito che il numero di disastri e di persone colpite a livello mondiale è aumentato rapidamente, raggiungendo un aumento percentuale approssimativamente del 400% e del 500% dal 1975 al 2005 [1]. Inoltre, l'aumento della popolazione e dell'urbanizzazione ha prodotto un aumento drammatico dell'esposizione, con conseguenze catastrofiche anche dopo eventi relativamente minori. L'Italia, che ha il più alto numero di siti del patrimonio mondiale dell'UNESCO, ha pagato un enorme tributo in termini di danni sismici al patrimonio culturale. A ciò si devono aggiungere i danni prodotti da altri fenomeni naturali, quali ad esempio le frane e le alluvioni, anche se queste ultime rientrano prevalentemente nell'ambito di interesse della prima sottotraiettoria. In questo contesto, si sono poi evidenziati interventi effettuati nel passato, errati, che oggi rappresentano una fonte aggiuntiva di vulnerabilità [2].
Azioni dell'uomo, come gli scavi per nuove *lifelines*, scavi e gallerie superficiali, ad esempio per nuove linee metropolitane nei centri urbani storici [3], hanno stimolato

varie indagini sperimentali e teoriche [4-6]. Il degrado dei materiali è una delle principali cause dei danni strutturali e nel campo archeologico [7] ha spesso portato a riduzioni significative dei livelli di sicurezza o addirittura a collassi catastrofici.

Analisi strutturale del patrimonio culturale storico

Le strutture monumentali sono generalmente caratterizzate da dimensioni e geometrie complesse e irregolari e da diverse tipologie murarie che rendono l'analisi dello stato di salute e della sua evoluzione, con riferimento alle molteplici sollecitazioni ambientali, un obiettivo certamente complesso.

Con riferimento al contesto sismico, le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, pubblicate dal MIBAC nel 2010 [8] costituiscono certamente un documento di riferimento per l'individuazione di un percorso di conoscenza e valutazione del livello di sicurezza di tali strutture. Altri documenti d'interesse sono certamente i contributi [9-12] dove sono proposti degli approcci per l'analisi strutturale del patrimonio culturale che evidenziano la necessità di coniugare un processo qualitativo di analisi preliminare della costruzione, basato su un'analisi storica, una conoscenza dei dettagli costruttivi, degli eventi passati e degli eventuali danni a questi connessi, con un processo quantitativo capace di valutarne la sicurezza.

Un recente stato dell'arte sulla modellazione numerica di strutture storiche in muratura è contenuto nella pubblicazione [13]. Tra le strategie di analisi disponibili [14-15], l'uso della modellazione FE rappresenta una delle scelte più comuni per la valutazione della sicurezza. Sebbene le procedure di recente generazione facilitino la loro implementazione [16-17], lo sforzo computazionale richiesto spesso non è praticabile ingegneristicamente [18] e non lo è certamente per l'identificazione dei danni in tempo reale attraverso back analysis. Allo stadio attuale dello sviluppo, metodi semplificati sono stati essenzialmente limitati al campo dell'ingegneria sismica e principalmente orientati alla modellazione di edifici residenziali ordinari [19]. Un inquadramento molto esaustivo sull'analisi del comportamento di strutture storiche è certamente fornito da [20].

***Structural Health Monitoring* - SHM**

Lo Structural Health Monitoring, o SHM, individua sistemi in grado di fornire informazioni in tempo reale sulle prestazioni effettive di una struttura basata su dati di monitoraggio [21]. I sistemi SHM si basano tipicamente sull'acquisizione continua di dati di risposta statici e dinamici in condizioni di esercizio e nell'applicazione di strumenti statistici o di machine learning idonei per estrarre le caratteristiche dei danni dai dati [22-23], rimuovendo gli effetti delle condizioni ambientali e rivelando, in modo automatico, la formazione di un danno nella struttura. Mentre la letteratura conta diversi studi applicativi di sistemi SHM per ponti ed infrastrutture [23-26], applicazioni documentate dell'efficacia del SHM nel caso di strutture storiche sono piuttosto rare e sostanzialmente limitate al rilevamento e alla localizzazione di danni causati da terremoti in strutture snelle, come le torri civiche [27-29]. Analogamente,

lo studio di approcci di identificazione del danno, utilizzando un numero ridotto di misurazioni e sorgenti multiple di eccitazioni, ha contributi teorici [30, 31] che, però, richiedono ulteriori sviluppi nel campo delle applicazioni alle costruzioni storiche. Alcune applicazioni molto innovative di monitoraggio con fibre ottiche si trovano, infine, in [32-34].

Tecniche di monitoraggio per l'analisi del degrado dei materiali rispetto alle diverse caratteristiche

L'analisi dei processi di degrado dei materiali lapidei utilizzati nel patrimonio culturale è oggetto di una intensa attività di ricerca e di applicazione [35, 36]. In particolare, sono state evidenziati i complessi rapporti esistenti tra la micro-struttura delle materiali lapidei [37], la loro composizione mineralogica [38] e le condizioni ambientali [39]. Nell'ambito dei beni culturali assume naturalmente importanza la classificazione delle forme di degrado. In Italia l'utilizzo delle NORMAL 1/88 ha trovato ampio spazio tuttavia classificazioni più quantitativamente dettagliate sono state sviluppate hanno un elemento di importanza maggiore per le finalità del monitoraggio. Fitzner [40] ha suddiviso le forme di degrado sulla base degli effetti: perdita di materiale; modifica del colore; distacchi, fessurazioni e deformazioni.
Molto meno frequenti risultano gli studi riguardanti i sistemi di monitoraggio continuo o discontinuo sia delle variabili intrinseche ed estrinseche che causano il degrado sia delle forme di degrado e dei loro effetti sui monumenti [41-44].

ANALISI DEI PRINCIPALI *STAKEHOLDER*

Il gruppo di esperti sta svolgendo una ricognizione degli attori principali che svolgono attività inerenti a tale traiettoria, ricognizione che rappresenta uno degli obiettivi del presente cluster. Da una prima analisi si riportano i seguenti elenchi che dovranno, pertanto, essere successivamente estesi e completati.

UNIVERSITÀ, EPR, IR, DISTRETTI

Università, Istituti di ricerca leader globali	
Università, Istituti di ricerca *leader* globali e *leader* nazionali	- Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura - Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura - Università di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse - Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica

	- Università di Catania Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali; Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana" - Università della Calabria Dipartimento di Biologia Ecologia e Scienze della Terra - Università di Bari Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali - Department of Mineralogy and Petrology of the University of Granada (Spain) - Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Charles University in Prague, Faculty of Science, Albertov 6, 12843 Prague, Czech Republic - Department of Archaeology, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 35, 9000 - Gent, Belgium - Università di Palermo Dipartimento di Fisica e Chimica e Dipartimento di Ingegneria - Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale - Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria e Dipartimento di Architettura - Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Centri di ricerca:	- ENEA Dipartimento di Tecnologie Energetiche: - Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche - **Laboratorio** del Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni, della divisione ICT Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e Territoriali - Laboratorio delle tecnologie per la DInamica delle Strutture e la PREVenzione del rischio sismico e idrogeologico Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare - Laboratorio Micro e Nano Strutture per la Fotonica, Divisione di Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute - INFN Sede di Catania - IBAM CNR - CNR - A. Faedo - Pisa (Girardi - Pellegrini)
Distretti	1. Centro di Eccellenza del DTC Lazio (www.dtclazio.it) - UNITA' DI RICERCA (https://dtclazio.it/unità -di-ricerca) - UR1: Nuove metodologie, tecnologie e strumenti diagnostici e di analisi per il miglioramento di tecniche di protezione del bene culturale finalizzate alla conservazione e monitoraggio degli artefatti. R1, R6, R8 - UR2: Nuovi materiali, tecnologie, strumenti e dispositivi per il monitoraggio, la conservazione, la protezione e il restauro dei beni culturali. R7, R12

	- UR5: Restauro, riqualificazione e valorizzazione di edifici e luoghi vincolati di elevato interesse storico, culturale e paesaggistico, sostenibilità ed efficientamento energetico, qualità dell'ambiente. R5, R9 2. Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi S.C.a r.l. 3. Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM) 4. Distretto Culturale evoluto Regione Marche (http://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Distretto-Culturale-Evoluto) 5. Distretto ad Alta Tecnologia per le Costruzioni Sostenibili STRESS (www.stress-scarl.com) - Recupero e la Valorizzazione del Costruito Storico: - Tecnologie di rilievo e monitoraggio; dalla scala territoriale a quella del singolo edificio; - Tecnologie per la mitigazione dei rischi naturali ed antropici; - Tecnologie per valorizzazione del costruito storico.
Progetti di ricerca di riferimento (*benchmark*), prodotti/servizi realizzati	1. ADAMO: Tecnologie di analisi, diagnostica, monitoraggio per la conservazione e il restauro dei beni culturali (http://progettoadamo.enea.it/) Progetto di ricerca finanziato nell'ambito del DTC Lazio 2. SISMI: Tecnologie per il miglioramento della Sicurezza e la rIcostruzione dei centri Storici in area sisMIca (https://dtclazio.it/progetti-di-ricerca) Progetto di ricerca finanziato nell'ambito del DTC Lazio; 3. Progetto regionale COBRA "Sviluppo e diffusione di metodi, tecnologie e strumenti avanzati per la COnservazione dei Beni culturali", basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti (lr13/2008 n. 1031), coordinamento con la divisione FSN-TECFIS, in compartecipazione con DTE-ICT e SSPT-SITEC (2015-2017); 4. PROVACI: Tecnologie per la protezione sismica e la valorizzazione di complessi di interesse culturale - (www.progettoprovaci.it); 5. Progetto Metrics - Metodologie e tecnologie per la gestione e riqualificazione dei centri storici e degli edifici di pregio (www.progetto-metrics.it); 6. Progetto Metropolis - Metodologie e tecnologie integrate e sostenibili per l'adattamento e la sicurezza di sistemi urbani (www.progetto-metropolis.it); 7. Progetto SensMat - Preventive solutions for Sensitive Materials of Cultural Heritage – H2020 - Tecnologie innovative per il rilievo, il monitoraggio e la gestione dei piccolo musei; 8. PERPETUATE - PERformance-based aPproach to Earthquake

	proTection of cUlturAl heriTage in European and mediterranean countries, Project funded by by the European Community under the Seventh Framework Programme (Theme ENV.2009.3.2.1.1); 9. ONSITEFORMASONRY - On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings, Project funded by the European Community under the 5th Framework Programme - Environment and Sustainable, Development (1998-2002) Contract N°: EVK4-CT-2001-00060, Project N°: EVK4-2001-00091; 10. EU-CHIC (EU- Cultural Heritage Identity Card, Project funded by the European Community under FP7 – Environment, Start date 01-09-2009 - end date 31-08-2012; 11. AGM for CuHe - Materiali di nuova generazione per il restauro dei Beni Culturali: nuovo approccio alla fruizione. PNR 2015-2020; 12. Nanotecnologie e nanomateriali per i beni culturali (TECLA). PON03PE_00214_1; 13. JPI CH (Joint Programming Initiative on Cultural Heritage and Global Change); 14. E-RIHS. 15. ECODIGIT ECOsistema DIGITale per la fruizione e la valorizzazione dei beni e delle attivita' culturali della regione Lazio (https://dtclazio.it/progetti-di-ricerca) Progetto di ricerca del DTC Lazio 16. ARCH Advancing Resilience of historic areas against Climate-related and other Hazards (Horizon 2020 - Grant agreement ID: 820999) 17. RoMA "Resilience Enhancement of Metropolitan Areas" Bando MIUR Smart Cities and Communities nel settore "Sicurezza del territorio" (2014-2016)
Reti di ricerca:	1. Reti di ricerca del DTC lazio (https://dtclazio.it/infrastruttura-di-ricerca) R1 - Tecnologie specializzate per le scienze dell'antichità, l'archeologia, la storia dell'arte R4 - Internet-of-things, robotica, intelligenza artificiale applicata alla cura e valorizzazione R5 - Analisi e consolidamento strutturale, monitoraggio geomatico, rilevamento e modellazione 3D dispositivi R6 - Scienze e tecnologie chimico- R7 - Nanotecnologie, materiali, sensori e dispositivi R8 - Biotecnologia applicate, archeobotanica, biologia ambientale, antropologia molecolare dispositivi R9 - Monitoraggio e qualità dell'ambientale outdoor e indoor, sostenibilità ed efficientamento energetico R12 - Fablab, rapid prototyping, additive manufacturing 2. Digital Research Infrastructures for the Arts and Humanities (DARIAH–ERIC), European Research Infrastructure for Heritage Science (E–RIHS)

	3. ECTP – European Construction Technology Platform – Heritage and regeneration Committee http://heritage.ectp.org/ 4. ERANET-European Research Area Network

IMPRESE

Leader globali e leader nazionali:
- AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica - A.L.I.G. Associazione Laboratori d'Ingegneria E Geotecnica - OICE Associazione nazionale delle società di ingegneria e architettura - Federcostruzioni - ANCE Associazione Nazionale Costruttori Edili

ALTRI PORTATORI DI INTERESSE

- MIBACT
- Musei
- Soprintendenze Archeologiche

Progetti di ricerca benchmark, prodotti/servizi realizzati (già sul mercato):
Progetto PROVACI: Diagnosi, monitoraggio integrato, e progettazione di interventi di mitigazione del rischio e messa in sicurezza con applicazione di materiali innovativi, del Monastero di S. Angelo d'Ocre (AQ) Diagnosi, caratterizzazione, e progettazione di interventi di miglioramento sismico di Palazzo Penne (NA). Installazione di sistemi di monitoraggio per la valutazione della risposta alle sollecitazioni ambientali e ad eventi sismici di beni storici nella città di Verona. Progetto METRICS: Indagini ispettive diagnostiche sulla struttura lignea di copertura del Salone della Meridana del MANN - Museo Archeologico Nazionale di Napoli per valutarne lo stato di degrado e fornire linee guida per la sua conservazione. Valorizzazione del Museo di Mineralogia, nell'antico Collegio massimo dei Gesuiti, e del Museo di Paleontologia nel Complesso di San Marcellino e Festo. Progetto METROPOLIS: Tecniche di radiografia muonica: sperimentazione sotto il Monte Echia, accessibile dalla Galleria Borbonica, con lo scopo di individuare la presenza di cavità in un contesto noto. Sistema integrato di supporto alle decisioni per la mitigazione e gestione dei rischi naturali ed antropici e applicazione sulle aree urbane di Napoli Est e Napoli Ovest.

PRINCIPALI STRUMENTI DI FINANZIAMENTO

- Linee Horizon 2020;
- ITN-ESPON, ESPON 2020 (European Observatory Network for Territorial Development and Cohesion)
- Med, ENPI Programma ENPI CB MED;
- Cosme, Life, Europa Cultura.

PROCESSO DI TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

Corsi di Alta Formazione
Eventi di disseminazione verso gli *stakeholder*
Eventi di disseminazione verso la popolazione per favorire la conoscenza nell'opinione pubblica delle nuove tecnologie
Dimostratori tecnologici per l'applicazione delle tecnologie sviluppate
Corsi di Apprendimento Permanente
Master
Seminari
Workshop

ANALISI SWOT (*STRENGTHS*, *WEAKNESSES*, *OPPORTUNITIES*, *THREATS*) DELL'AMBITO DI RICERCA E APPLICAZIONE IN ITALIA

Punti di forza	- Presenza di un enorme patrimonio culturale - Elevata professionalità negli operatori del restauro	- Elevato livello di conoscenze di base sui meccanismi di degrado - Ottime competenze a livello accademico e industriale
Punti di debolezza	- Scarso livello di applicazione delle conoscenze di base - Interdisciplinarità da integrare maggiormente Assenza nel quadro occupazionale di figure specifiche per il monitoraggio dei beni culturali	- Carenza di studi interdisciplinari - Tematica non ancora riconosciuta come un vero e proprio settore industriale

Opportunità	- Sviluppo di tecnologie specifiche e di applicazioni di metodologie innovative per beni culturali - Creazione di nuove figure professionali (es: tecnico del monitoraggio dei beni culturali)	- Creazione di uno protocollo per il monitoraggio dei beni culturali che possa essere riconosciuto come standard dalla comunità scientifica e dagli stakeholders - Creazione di un database
Minacce	- Sviluppo di ricerche volte a monitorare singoli aspetti e mancanza di un'analisi e di una tecnologia che permetta di monitorare il monumento nei confronti delle differenti problematiche del degrado - Scarsità dei fondi a disposizione	- Interpretazione del monitoraggio delle strutture esclusivamente dal punto di vista dell'acquisizione dei dati che rappresenta solo una fase del processo di valutazione della sicurezza della costruzione

7.3. MONITORAGGIO ALLA SCALA DEL CONTENUTO O DEL DETTAGLIO

Lo stato di conservazione delle opere d'arte, e in particolare la sua evoluzione nel tempo e la sua interdipendenza con fattori esterni (temperatura, umidità relativa, ecc.) è la somma di diverse correlazioni tra causa e alterazione. Il monitoraggio delle alterazioni può trovare risposta attraverso specifici prodotti tecnologici sviluppati per la lettura nel tempo di tali alterazioni. Tali prodotti dovranno garantire l'accuratezza della risposta anche al variare delle condizioni al contorno (come ad esempio una differente illuminazione del manufatto sottoposto a monitoraggio). Lo sviluppo di tali tecnologie spinge inoltre ad una forte interazione e integrazione con le tecnologie già consolidate di monitoraggio ambientale, nell'ottica di una corretta correlazione tra alterazione, evoluzione dell'alterazione e dati ambientali.
Per il monitoraggio in continuo dei parametri ambientali (temperatura e umidità relativa dell'aria, luce, polveri, ecc.) le tecnologie sono ormai consolidate per la parte di sensoristica, mentre sussistono possibilità di sviluppo per la parte di comunicazione wireless dei dati; in particolare si sottolinea la necessità di superare le attuali modalità di trasmissione dei dati su rete WiFi, poiché sussistono limiti nella loro applicazione in contesti quali le residenze storiche, dove la conformazione stessa dell'edificio può limitare la copertura di una adeguata rete WiFi. Dalla ricognizione bibliografica sullo stato dell'arte appare invece molto carente lo sviluppo di tecnologie per il monitoraggio in continuo dello stato di conservazione delle opere d'arte. Questo viene di fatto esclusivamente rilevato dalla ricognizione, periodica o spot, di personale specializzato (restauratori, conservatori, tecnici del restauro).
Lo sviluppo di sistemi di monitoraggio delle alterazioni presenti sulle opere d'arte dovrà necessariamente prevedere lo sviluppo di tecnologie integrate non solo per la simultanea raccolta dei dati relativi all'evoluzione nel tempo delle alterazioni e alla loro intensità ed estensione e dei dati relativi all'ambiente in cui il manufatto e

custodito, ma anche dotate di una logica di correlazione causa-effetto che tenga conto dei dati di monitoraggio. Tali tecnologie dovranno essere pensate per essere non impattanti con il peculiare contesto in cui sono inserite, sia da un punto di vista estetico e di fruizione dei manufatti, sia da un punto di vista della sostenibilità economica che un tale sistema di monitoraggio dovrà garantire. Lo sviluppo tecnologico di questi sistemi di monitoraggio deve necessariamente prevedere una piattaforma di raccolta, organizzazione ed elaborazione dei dati, configurabile sotto differenti livelli di profilazione.

Nell'ambito di tale sottotraiettoria appare evidente, inoltre, l'interazione con la *traiettoria 1* del *Cluster Tiche*.

I dati raccolti relativi al monitoraggio ambientale e al monitoraggio dello stato di conservazione delle collezioni e delle opere d'arte, dovranno confluire in una piattaforma gestionale pensata in un'ottica di conservazione preventiva e *risk assessment*: tali dati infatti contribuiscono alla definizione di livelli di rischio e priorità di azioni di mitigazione degli stessi.

Lo stato dell'arte sulla sottotraiettoria 7.3 può essere analizzato, alla luce della bibliografia scientifica (vedi in seguito), sulla base di due ampie macrocategorie tematiche:

Monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche
Monitoraggio delle collezioni e delle opere d'arte

Va comunque rilevato che per entrambi i temi (monitoraggio ambientale degli edifici e monitoraggio delle collezioni), l'Italia risulta il Paese con il maggior numero di pubblicazioni.

Monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche

Il tema del monitoraggio ambientale viene affrontato sia dal punto di vista più globale delle strategie di conservazione preventiva e risk assessment, sia dal punto di vista dello sviluppo tecnologico, nei due indirizzi dello sviluppo di tecnologie di rilevamento (sensori) e dello sviluppo di tecnologie di trasmissione dei dati, quest'ultima sempre più orientata verso la modalità wireless abbinata a sistemi cloud. In particolare, sono proprio le tecnologie di trasmissione dati in modalità wireless ad essere le più presenti nelle attività di ricerca. Figura 48 mostra come per il tema del monitoraggio ambientale dei beni culturati l'Italia risulta il Paese con il maggior numero di pubblicazioni.

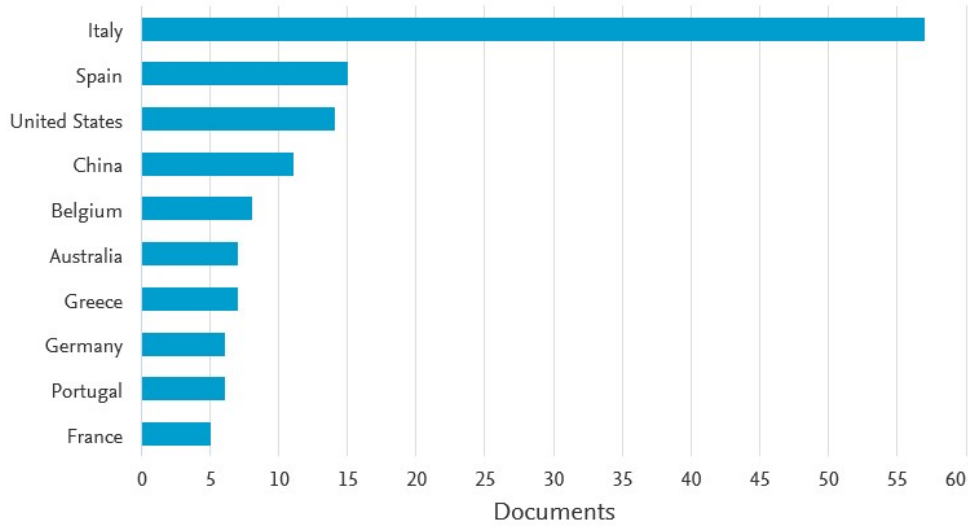

Figura 48. Il numero di documenti su Scopus per paese di pubblicazione per le parole chiave "environmental monitoring cultural heritage" (anni 2016-2019).

Monitoraggio delle collezioni e delle opere d'arte

Il tema del monitoraggio delle opere d'arte con tecnologie di rilevamento in continuo dei dati è poco sviluppato in letteratura, come dimostrano i pochi contributi scientifici a disposizione.
è poco sviluppato in letteratura, come dimostrano i pochi contributi scientifici a disposizione.

Il tema del monitoraggio delle opere d'arte con tecnologie di rilevamento in continuo dei dati è poco sviluppato in letteratura, come dimostrano i pochi articoli presenti. Ciò nonostante Figura 49 mostra come per tale tema l'Italia risulta il Paese con il maggior numero di pubblicazioni.

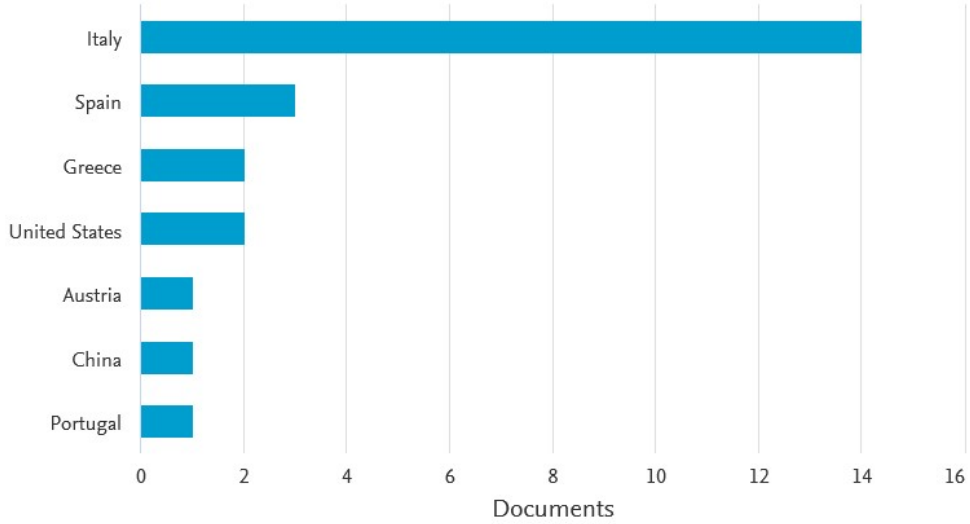

Figura 49. Il numero di documenti su Scopus per paese di pubblicazione per le parole chiave " cultural heritage artwork monitoring" (anni 2016-2019).

ANALISI DEI PRINCIPALI *STAKEHOLDER*

Il gruppo di esperti sta svolgendo una ricognizione degli attori principali che svolgono attività inerenti a tale traiettoria, ricognizione che rappresenta uno degli obiettivi del presente cluster. Da una prima analisi si riportano i seguenti elenchi che dovranno, pertanto, essere successivamente estesi e completati.

UNIVERSITÀ, EPR, IR, DISTRETTI

Università, Istituti di ricerca leader globali	
Università, Istituti di ricerca *leader* globali e *leader* nazionali	- Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura - Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura - Università di Napoli Federico II Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse - Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica - Università di Catania Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali; Dipartimento di Fisica e Astronomia "Ettore Majorana" - Università della Calabria Dipartimento di Biologia Ecologia e Scienze della Terra

	- Università di Bari Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali - Department of Mineralogy and Petrology of the University of Granada (Spain) - Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Charles University in Prague, Faculty of Science, Albertov 6, 12843 Prague, Czech Republic - Department of Archaeology, Ghent University, Sint-Pietersnieuwstraat 35, 9000 - Gent, Belgium - Università di Palermo Dipartimento di Fisica e Chimica e Dipartimento di Ingegneria - Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale - Università di Roma Tre, Dipartimento di Ingegneria e Dipartimento di Architettura - Università di Roma La Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
Centri di ricerca:	- ENEA - Dipartimento di Tecnologie Energetiche: - Laboratorio di Analisi e Protezione delle Infrastrutture Critiche - Laboratorio del Calcolo Scientifico ad Alte Prestazioni, della divisione ICT - Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi produttivi e Territoriali - Laboratorio delle tecnologie per la DInamica delle Strutture e la PREVenzione del rischio sismico e idrogeologico - Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare - Laboratorio Micro e Nano Strutture per la Fotonica, Divisione di Tecnologie Fisiche per la Sicurezza e la Salute - INFN Sede di Catania - IBAM CNR - CNR - A. Faedo - Pisa (Girardi - Pellegrini)
Distretti	- Centro di Eccellenza del DTC Lazio (www.dtclazio.it) UNITA' DI RICERCA (https://dtclazio.it/unità -di-ricerca): - UR1: Nuove metodologie, tecnologie e strumenti diagnostici e di analisi per il miglioramento di tecniche di protezione del bene culturale finalizzate alla conservazione e monitoraggio degli artefatti. R1, R6, R8 [attinente alla sottotraiettoria 3] - UR2: Nuovi materiali, tecnologie, strumenti e dispositivi per il monitoraggio, la conservazione, la protezione e il restauro dei beni culturali. R7, R12 [attinente alla sottotraiettorie 3 e 2] - UR5: Restauro, riqualificazione e valorizzazione di edifici e luoghi vincolati di elevato interesse storico, culturale e paesaggistico, sostenibilità ed

	efficientamento energetico, qualità dell'ambiente. R5, R9 [attinente alla sottotraiettoria 2] - Distretto Tecnologico Sicilia Micro e Nano Sistemi S.C.a r.l. - Consorzio Interuniversitario Nazionale per la Scienza e Tecnologia dei Materiali (INSTM) - Distretto Culturale evoluto Regione Marche (http://www.regione.marche.it/Regione-Utile/Cultura/Distretto-Culturale-Evoluto) - Distretto ad Alta Tecnologia per le Costruzioni Sostenibili STRESS (www.stress-scarl.com) - Recupero e Valorizzazione del Costruito Storico: - Tecnologie di rilievo e monitoraggio, dalla scala territoriale a quella del singolo edificio; - Tecnologie per la mitigazione dei rischi naturali ed antropici; - Tecnologie per valorizzazione del costruito storico.
Progetti di ricerca di riferimento (*benchmark*), prodotti/servizi realizzati	- ADAMO: Tecnologie di analisi, diagnostica, monitoraggio per la conservazione e il restauro dei beni culturali (http://progettoadamo.enea.it/) Progetto di ricerca finanziato nell'ambito del DTC Lazio [attinente più alla sottotraiettoria 3] - ECODIGIT ECOsistema DIGITale per la fruizione e la valorizzazione dei beni e delle attivita' culturali della regione Lazio (https://dtclazio.it/progetti-di-ricerca) - Progetto di ricerca del DTC Lazio - ARCH *Advancing Resilience of historic areas against Climate-related and other Hazards* (Horizon 2020 - Grant agreement ID: 820999) - JPI CH (Joint Programming Initiative on Cultural Heritage and Global Change) - HERACLES (HEritage Resilience Against CLimate Events On-Site) – H2020 - PROTHEGO (PROTection of European Cultural HEritage from GeO-hazards) H2020 - HERCULES (Sustainable Futures for Europe's Heritage in Cultural Landscapes) H2020

IMPRESE

Leader globali e leader nazionali:
- AIPnD - Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica - A.L.I.G. - Associazione Laboratori d'Ingegneria E Geotecnica - OICE - Associazione nazionale delle società di ingegneria e architettura - Federcostruzioni - ANCE - Associazione Nazionale Costruttori Edili

ALTRI PORTATORI DI INTERESSE

Beneficiari di questo sviluppo tecnologico saranno i gestori dei Musei\Residenze\Collezioni, che potranno fornire indicazioni su come sviluppare in particolare l'interfaccia di front-end per la gestione e l'elaborazione dei dati. Potranno inoltre indicare vincoli e limiti di applicabilità delle tecnologie negli ambienti espostivi.
MIBAC
Musei
Soprintendenze Archeologiche

PRINCIPALI STRUMENTI DI FINANZIAMENTO

Linee Horizon 2020
ITN-ESPON, ESPON 2020 (European Observatory Network for Territorial Development and Cohesion)
Med,
ENPI Programma ENPI CB MED,
Cosme, Life, Europa Cultura

PROCESSO DI TRASFERIMENTO TECNOLOGICO

Corsi di Alta Formazione
Eventi di disseminazione verso gli stakeholder
Eventi di disseminazione verso la popolazione per favorire la conoscenza nell'opinione pubblica delle nuove tecnologie
Dimostratori tecnologici per l'applicazione delle tecnologie sviluppate
Corsi di Apprendimento Permanente
Master
Seminari
Workshop

ANALISI SWOT (*STRENGTHS*, *WEAKNESSES*, *OPPORTUNITIES*, *THREATS*) DELL'AMBITO DI RICERCA E APPLICAZIONE IN ITALIA

Punti di forza	- Presenza di un enorme patrimonio culturale - Elevato livello di conoscenze di base sui meccanismi di degrado	- Elevata professionalità negli operatori del restauro - Ottime competenze a livello accademico e industriale
Punti di debolezza	- Scarso livello di applicazione delle conoscenze di base - Carenza di studi interdisciplinari - Assenza nel quadro occupazionale di figure specifiche per il monitoraggio dei beni culturali	- Interdisciplinarietà di integrare maggiormente - Tematica non ancora riconosciuta come un vero e proprio settore industriale
Opportunità	- Sviluppo di tecnologie specifiche e di applicazioni di metodologie innovative per beni culturali - Creazione di uno protocollo per il monitoraggio dei beni culturali che possa essere riconosciuto come standard dalla comunità scientifica e dagli stakeholders	- Creazione di nuove figure professionali (es: tecnico del monitoraggio dei beni culturali) - Creazione di un database
Minacce	- Sviluppo di ricerche volte a monitorare singoli aspetti e mancanza di un'analisi e di una tecnologia che permetta di monitorare il monumento nei confronti delle differenti problematiche del degrado - Scarsità dei fondi a disposizione	- Interpretazione del monitoraggio delle strutture esclusivamente dal punto di vista dell'acquisizione dei dati che rappresenta solo una fase del processo di valutazione della sicurezza della costruzione.

ROADMAPPING

Definizione dell'ambito della ricerca (tecnologie indagate):

Gestione dei dati da monitoraggio

Esistono diversi margini di miglioramento a partire da quanto già disponibile. Negli ultimi anni si assiste alla disponibilità di enormi quantità di dati (Big Data), ma molto spesso mancano o sono insufficienti le procedure e le tecniche di sintesi di tali dati. In tale *framework*, risulta necessario:

- Mettere a punto procedure semi-automatiche di elaborazione delle immagini satellitari ed aeree ad alta risoluzione in quasi-real-time, per l'analisi dei possibili cambiamenti del territorio (mappa deformazioni superficiali, individuazione aree allagate, individuazione aree incendiate) e delle condizioni deformative degli edifici presenti nell'area;
- Sviluppare procedure di integrazione di dati spazialmente distribuiti (imaging) con dati puntuali (calibrazione e validazione);
- Affrontare il problema dei big-data. Tale questione è sempre più presente e attuale, data la possibilità di accedere a dati sempre più ricchi e precisi in termini di risoluzione geometrica, bande spettrali, frequenza temporale;
- Creare un *Repository* dei dati per la messa in rete delle mappe di rischio fruibili da enti pubblici e privati preposti alla sicurezza del territorio e dei beni presenti che permetta una classificazione a varie grandezze di scala del territorio per la gestione delle emergenze, beneficiando di eventuali livelli di allarme predisposti nei sistemi di monitoraggio. Una possibile soluzione potrebbe essere di utilizzare come base il Geoportale Nazionale. La questione risulta di fondamentale importanza per rendere accessibili i prodotti anche per i non addetti ai lavori.

Valutazione degli effetti del degrado sulla sicurezza del patrimonio culturale

Il monitoraggio dello stato delle strutture (Structural Health Monitoring - SHM) può fornire risultati di maggiore impatto se supportato da modelli computazionalmente efficienti che limitano l'uso di modellazioni FE 3D raffinate e seguono un approccio multiscala, affine agli obiettivi di volta in volta posti per la salvaguardia del patrimonio culturale. Inoltre, si potrebbero ottenere ulteriori benefici nel caso di numero ridotto di misurazioni e sorgenti multiple di eccitazioni dovute a sollecitazioni ambientali, quali ad esempio le vibrazioni da traffico in aree urbane.

Monitoraggio dei processi di degrado dei materiali lapidei naturali e artificiali utilizzati nei beni culturali

Nel monitoraggio dei fenomeni di degrado è utile distinguere il monitoraggio delle principali fattori che producono danni ai beni culturali e il monitoraggio degli effetti

dei processi di alterazione.
Relativamente al primo tema sono da segnalare: a) le tecnologie per il monitoraggio ambientale con dispositivi e sensoristica che permettono di evidenziare le variazioni degli agenti inquinanti atmosferici; b) il monitoraggio delle condizioni climatiche con sensori di T dell'aria e del manufatto, RH, piovosità, radiazione solare, vento capaci di registrare anche eventi estremi e termometria IR; c) il monitoraggio dell'attività biologica; d) le variazioni dell'acqua all'interno del sistema poroso dei materiali e la sua composizione chimica.
Seguendo la classificazione delle forme di degrado di Fitzner è possibile individuare tecnologie inerenti: a) variazione di volume attraverso laser scanner e sistemi digitali di mappatura 3D sia a scala di monumento sia a scala di dettaglio; b) modificazione del colore e depositi grazie a analisi di immagine anche multispettrale, analisi di spettrometria Raman in remoto e spettroscopia LIBS; c) distacchi, fessurazioni e deformazioni attraverso tecniche di analisi di immagine, laser scanner, sistemi digitali di mappatura 3D e sistemi di rilevazione di raggi cosmici muoni. Quest'ultima tecnica estremamente innovativa permette di osservare in continuo lo scostamento del monumento o di porzioni di esso con precisione dell'ordine del centesimo di cm.

Svolgimento dell'esercizio di analisi e ricerca

Valutazione degli effetti del degrado sulla sicurezza del patrimonio culturale
L'analisi e la ricerca potranno svilupparsi nel verso di nuovi approcci analitico-strumentali finalizzati alla valutazione quantitativa degli effetti dell'invecchiamento e del degrado del materiale sulla sicurezza strutturale del patrimonio culturale. Attraverso l'uso combinato di modellazioni strutturali e Structural Health Monitoring - SHM, le finalità della ricerca potranno essere quelle di fornire indicazioni e strumenti operativi per l'identificazione, la localizzazione e la quantificazione del danno strutturale, per la gestione del patrimonio culturale costruito.

Monitoraggio dei processi di degrado dei materiali lapidei naturali e artificiali utilizzati nei beni culturali
Lo sviluppo delle ricerche sul monitoraggio dei processi di degrado permetterà un avanzamento sostanziale nella salvaguardia dei beni culturali attraverso un percorso che prevede: 1) lo studio dell'evoluzione dei fattori che controllano i fenomeni di degrado e degli effetti sui materiali lapidei; 2) l'individuazione dei rapporti tra le variabili e l'innescarsi o il progredire dei processi alteratici.
Quest'analisi permetterà di monitorare anche l'effetto delle misure di contrasto adottate individuando le migliori tecniche per la salvaguardia del bene in oggetto. Nell'ambito di tale traiettoria si individua pertanto la necessità di istituire efficaci tecnologie di monitoraggio che consentano di valutare l'uso di nuovi consolidanti e protettivi nonché di innovativi materiali di sostituzione e di risanamento di porzioni del monumento.

Trend di sviluppo della tecnologia in ottica di medio-lungo termine (tendenza, sfide, fabbisogno di innovazione, fattori critici di successo, opportunità di mercato, modelli di business):

Valutazione degli effetti del degrado sulla sicurezza del patrimonio culturale

Lo sviluppo della tecnologia dovrà portare con sé anche il necessario supporto fornito da attività sperimentali. Queste dovranno seguire lo stesso approccio multiscala della ricerca e dello sviluppo della tecnologia: da campioni su piccola scala a prototipi di costruzioni reali. Inoltre, saranno certamente utili validazioni sul campo mediante strutture storiche reali che potranno fungere da benchmark per valutare la capacità di identificare, localizzare e infine quantificare il danno indotto dal degrado, attraverso un'elaborazione congiunta di monitoraggio e simulazioni strutturali per la prevenzione del rischio.

Monitoraggio dei processi di degrado dei materiali lapidei naturali e artificiali utilizzati nei beni culturali

Le specificità degli oggetti richiedono lo sviluppo di tecnologie che non siano invasive nei confronti del bene storico-artistico. La miniaturizzazione dei sistemi di monitoraggio e l'uso delle nanotecnologie per la creazione di sistemi di rilevazione delle variazioni del sistema sono quindi delle frontiere aperte che i progetti devono prevedere. Ulteriori problematiche sono quelle relative alle modalità di connessione della rete di monitoraggio in remoto con sistemi wireless. Sviluppi importanti sono inoltre previsti dall'utilizzo di metodologie innovative già sperimentate in altri campi come ad esempio la scansione attraverso i raggi cosmici. In fine si rende indispensabile un sistema di integrazione dei dati anche con l'utilizzo di software opportuni che diano la possibilità di avere dei parametri di controllo in tempo reale e in continuo dello stato dei processi di degrado.

LETTERATURA SCIENTIFICA DI RIFERIMENTO:

7.1

Agapiou A., Lysandrou V. Themistocleous K. & Hadjimitsis, D.G. (2016). Risk Assessment of Cultural Heritage Sites Clusters Using Satellite Imagery and GIS: the Case Study of Paphos District, Cyprus.Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards. 2, pp. 1-15. DOI: 10.1007/s11069-016-2211-6.

Agapiou A., Lysandrou V., Alexakis D. D., Themistocleous K., Cuca B., Sarris A., Argyrou N. & Hadjimitsis D. G. (2015). Cultural Heritage Management and Monitoring Using Remote Sensing Data and GIS: the Case Study of Paphos area, Cyprus. Computers, Environment and Urban Systems, 54, pp. 230-239. http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.09.003.

Cigna F., Del Ventisette C., Gigli G., Menna F., Agili F., Liguori V. & Casagli N. (2012). Ground instability in the old town of Agrigento (Italy) depicted by on site investigations and Persistent Scatterers data. Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, pp. 3589-3603.

Clemente et al. (2019), Effectiveness of HDRB isolation systems under low energy earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 118:207-220 DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.12.018.

De Canio et al. (2015), Seismic monitoring of the Cathedral of Orvieto: Combining Satellite InSAR with In-Situ Techniques, in Proc of 7th Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures, SHMII 2015.

Di Pietro et al. (2016), Design of DSS for supporting preparedness to and management of anomalous situations in complex scenarios, Studies in Systems, Decision and Control, Springer International Publishing https://doi.org/10.1007/978-3-319-51043-9_9

Lasaponara R., Masini N. (2013). Satellite synthetic aperture radar in archaeology and cultural landscape: An overview. ArchaeologicalProspection, 20, pp. 71–78.

Lo Brutto M., Garraffa A., Meli P. (2014). UAV Platforms for Cultural Heritage Survey: First Results. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5, 2014, pp. 227-234.

Margottini C., Spizzichino D., Cigna F., Crosta G. B., Frattini P., Themistocleous, K. & Fernandez Merodo J. A. (2016) European UNESCO Cultural Heritage and Geo – Hazards: The PROTHEGO Project". In: Proceedings of the Fourth International Conference on Remote Sensing and Geo-information of Environment, 4-8 April, 2016, Paphos, Cyprus.

Mongelli M. et al., 2017, 3D Photogrammetric reconstruction by drone scanning for FE analysis and crack pattern mapping of the “Bridge of the Towers”, Spoleto, in Proc. of 5th International Conference on Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials, Bologna 28-30 June, Italy, published in Key Engineering Materials, Vol. 747 ISBN: 978-3-0357-1164-6, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.747.423.

Spizzichino D.,Leoni G., Comerci V., Brustia E., Guerrieri L., Dessi B., Trigila A., Iadanza C.(2016). PROTHEGO Deliverable D.01.01: UNESCO Cultural Heritage Vs Natural hazards at European scale, Version 1.0. JPICH Heritage Plus PROTHEGO project, Open Report. Date 15/12/2016. pp. 30.

Themistockeous K. (2018). PROTHEGO Deliverable D.05.01: High Tech Monitoring Techniques,

Version 1.1. JPI-CH Heritage Plus PROTHEGO project, Open Report. Date 28/02/2018. pp. Page(s).Available at: www.prothego.eu.

Zhou W., Chen F., Guo H. (2015). Differential Radar Interferometry for Structural and Ground Deformation Monitoring: A New Tool for the Conservation and Sustainability of Cultural Heritage Sites. Sustainability (Basel), ISSN 2071-1050, doi:10.3390/su7021712, pp.1712-1729.

7.2

Prestazioni strutturali del patrimonio culturale, effetti del degrado ed errati interventi del passato

1. Independent Evaluation Group (2007) Development actions and the rising incidence of disasters. Washington, DC: The World Bank.
2. Parisi F, Augenti N (2013) Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks. Engineering Failure Analysis,34:735-760.
3. Amorosi A, Boldini D, De Felice G, Malena M, and Sebastianelli M (2014) Tunnelling-induced deformation and damage on historical masonry structures. Géotechnique, 64(2),118–130.
4. Son M, Cording EJ (2007) Evaluation of building stiffness for building response analysis to excavation-induced ground movements. J. Geotech. Geoenviron. Eng.995–1002.
5. Giardina G, Marini A, Hendriks MAN, Rots JG, Rizzardini F, Giuriani E. (2012) Experimental analysis of a masonry facade subject to tunnelling-induced settlement. Eng. Struct.,45:421–434.
6. Giardina G, Hendriks MAN, Rots JG (2014) Damage Functions for the Vulnerability Assessment of Masonry Buildings Subjected to Tunneling. J. Struct. Eng., 04014212.
7. Lignola GP, Giamundo V, de Martino G (2015) Influence of short segments in the trabeation with opposing inclined edges on the seismic vulnerability of the marble blocks colonnade in the archaeological site of Pompeii. Int. J. Architectural Heritage,9(7):883-895.

Analisi strutturale del patrimonio culturale storico

8. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (d.m. 14 gennaio 2008), MIBACT nel 2010.
9. PERPETUATE Guidelines for seismic performance-based assessment of cultural heritage masonry structures, by Sergio Lagormarsino and Serena Cattari, Bull. Earthquake Eng (2015) 13:13-47?).
10. ICOMOS (2005), Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage, ISCARSAH, Document approved on 15/06/2005 in Barcelona, Spain.
11. CIB 335 “Guide for the Structural Rehabilitation of Heritage Buildings”, 2010.
12. ISO13822 (2010) “Based for Design of structures. Assessment of existing structures", second edition 2010-08-01. ISO International Standard, Switzerland.
13. Numerical modelling of Masonry and Historical structures. From Theory to Application, Edited by Gabriele Milani and Baham Ghassi, WP Elsevier, 2019-06-25.
14. Lourenco PB (2002) Computations on historical masonry structures, Prog. Struct. Engng Mater., 4:301–319.
15. Roca P, Cervera M, Gariup G, Pelà L (2010) Structural analysis of masonry historical constructions. Classical and Advanced Approaches. Arch Comput Methods Eng, 17: 299–325.
16. Castellazzi G, D’Altri AM, de Miranda S, Ubertini F (2017) An Innovative Numerical Modeling Strategy for the Structural Analysis of Historical Monumental Buildings, Eng. Struct.,132:229–248.
17. Clementi F, Gazzani V, Poiani M, Lenci S (2016) Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling, J. Build. Eng. 8:29–47.
18. Clementi, F., Ferrante, A., Giordano, E., Dubois, F., Lenci, S. (2019) Damage assessment of ancient masonry churches stroked by the Central Italy Earthquakes of 2016 by the Non-

Smooth Contact Dynamics method, Bulletin of Earthquake Engineering, DOI: 10.1007/s10518-019-00613-4.
19. Penna A, Senaldi IE, Galasco A, Magenes G (2016) Numerical Simulation of Shaking Table Tests on Full-Scale Stone Masonry Buildings. Int. J. Architectural Heritage, 10(2-3): 146-163.
20. Como M. (2013), Statics of Historic Masonry Constructions, Springer.

Structural Health Monitoring – SHM

21. Deraemaeker A, De Roeck G, Kullaa J (2008) Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment. Mech Syst Signal Proc,22(1):34 – 56.
22. Worden K, Sohn H, Farrar C (2002) Novelty detection in a changing environment: regression and interpolation approaches. J Sound Vib 258(4):741-761.
23. Farrar CR, Worden K (2012) Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective. John Wiley & Sons, Ltd.
24. Peeters B, De Roeck G (2001) One-year monitoring of the Z 24-Bridge: environmental effects versus damage events. Earthquake Eng Struct 30(2):149–171.
25. Magalhães F, Cunha A, Caetano E (2012) Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. Mech Syst Signal Proc 28:212–228.
26. Cross E, Koo K, Brownjohn J, Worden K (2013) Long-term monitoring and data analysis of the Tamar Bridge. Mech Syst Signal Pr 35(1-2):16-34.
27. Pea F, Lourenço PB, Mendes N, Oliveira DV (2010) Numerical models for the seismic assessment of an old masonry tower. Eng Struct 32(5):1466-1478.
28. Ubertini F, Cavalagli N, Kita A, Comanducci G (2018) Assessment of a monumental masonry bell-tower after 2016 Central Italy seismic sequence by long-term SHM, Bull Earthquake Eng,16(2):775-801.
29. Clementi F., Pierdicca A., Formisano A., Catinari F., Lenci S. (2017) Numerical model upgrading of a historical masonry building damaged during the 2016 Italian earthquakes: the case study of the Podestà palace in Montelupone (Italy), J. of Civil Structural Health Monitoring, 7(5):703–17.
30. Yu J., Imbimbo M., Betti R., (2009). Identification of linear structural systems with a limited set of input-output measurements, Journal of Applied Mechanics, 76(3): 031005.1-031005.10, 2009, ASME.
31. Grande E., Imbimbo M. (2016). A multi-stage approach for damage detection in structural systems based on flexibility. Mechanical Systems and Signal Processing, 76: 455-475, Academic Press Inc.
32. Caponero, M.A., Dell'Erba, D. & Kropp, C. "Use of fibre optic sensors for structural monitoring of temporary emergency reinforcements of the church S. Maria delle Grazie in Accumoli" Journal of Civil Structural Health Monitoring (2019). https://doi.org/10.1007/s13349-019-00335-w
33. M. A. Caponero, R. D'Amato, A. Polimadei, and G. Terranova, "Development of FBG humidity sensors for stone condition monitoring," in Proceedings of 3rd IMEKO International Conference on Metrology for Archaeology and Cultural Heritage, Lecce, Italy, 2017.
34. R. Fantoni et al., "Laser scanners for remote diagnostic and virtual fruition of cultural heritage," Optical an Quantum Electronics, vol. 49, no. 3, p. 120, 2017.
35. A Di Pietro et al. (2016), Design of DSS for supporting preparedness to and management of anomalous situations in complex scenarios, Studies in Systems, Decision and Control, Springer International Publishing https://doi.org/10.1007/978-3-319-51043-9_9.
36. Mongelli, M. et al., 2017, 3D Photogrammetric reconstruction by drone scanning for FE analysis and crack pattern mapping of the "Bridge of the Towers", Spoleto, in Proc. of 5th International Conference on Mechanics Of Masonry Structures Strengthened With Composite Materials, Bologna 28-30 June, Italy, published in Key Engineering Materials, Vol. 747 ISBN: 978-3-0357-1164-6, DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.747.423.

37. Mongelli M., et al., From 2D digital imaging to finite element analysis using the ENEAGRID high performance computing infrastructure for the preservation of historical masonry structures; International Journal of Masonry Research and Innovation; Jan 2018, Vol. 3, Issue 3, pp. 324-347 https://doi.org/10.1504/IJMRI.2018.093492.
38. Roselli I. et al., Health assessment and ambient vibration testing of the "Ponte delle Torri" of Spoleto during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence; April 2018 Journal of Civil Structural Health Monitoring 8(2):199–216; DOI: 10.1007/s13349-018-0268-5.
39. G. De Canio et al (2015), Seismic monitoring of the Cathedral of Orvieto: Combining Satellite InSAR with In-Situ Techniques, in Proc of 7th Int. Conf. on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructures, SHMII 2015.
40. P. Clemente, et al. (2019), Effectiveness of HDRB isolation systems under low energy earthquakes, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 118:207-220 DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.12.018.

Tecniche di monitoraggio per l'analisi del degrado dei materiali rispetto alle diverse caratteristiche

41. Price.C.A.; Stone conservation. An Overview of Current Research. The Getty Conservation Institute, USA, 73 pp (1996).
42. Siegesmund S., Snethlage R.; Stone in Architecture: Properties, Durability. Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2014).
43. B.A. Richardson, The durability of porous stones, Stone Ind. 26 (1991). 25-22.
44. Bonavente D., Cultrone G., Gómez-Heras M. The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. European Journal of Mineralogy (2008) 20 (4): 673-685.
45. Winkler, E.M.; Stone: properties, durability in man´s environment. Springer-Verlag, WienNew York, (1973).
46. Fitzner, B. and Heinrichs, K.; Proceeding of the International Conference Stone Weathering and Atmospheric Pollution Network (SWAPNET): Understanding and Managing Stone Decay, Czech Republic, (Prikryl, R., Viles, H.A., Eds.), 11-56 (2001).
47. Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation European Geosciences Union. General Assembly, Geological Society of London Geological Society of London, 2007
48. Zehnder K., Schoch O. Efflorescence of mirabilite, epsomite and gypsum traced by automated monitoring on-site. Journal of Cultural Heritage 10 (2009) 319–330.
49. Grossi C.M., Esbert R.M., Diaz-Pache F., Alonso F.J. Soiling of building stones in urban environments. Building and Environment 38 (2003) 147 – 159.
50. Sandrolinia F., Franzonia E., Sassonia E., Diotallevi P.P. The contribution of urban-scale environmental monitoring to materials diagnostics: A study on the Cathedral of Modena (Italy). Journal of Cultural Heritage 12 (2011) 441–450.

7.3

Monitoraggio ambientale degli edifici-museo e delle residenze storiche

51. Pandey, S. K., Mohanta, G. C., & Kumar, P. (2019). Development of Disposable Sensor Strips for Point-of-Care Testing of Environmental Pollutants. Advances in Nanosensors for Biological and Environmental Analysis, 95.
52. Alsuhly, G., & Khattab, A. (2018, August). An IoT Monitoring and Control Platform for Museum Content Conservation. In 2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA) (pp. 196-201). IEEE.
53. Lindquist, L. I. (2018). A Fungal Species Analysis of the Museum of Texas Tech University (Doctoral dissertation).

54. Mackey, A., Spachos, P., & Plataniotis, K. N. (2018, November). Enhanced Indoor Navigation System with Beacons and Kalman Filters. In 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP) (pp. 947-950). IEEE.
55. Bode, C. A., Baxter, W., Dietrich, W. E., Fenwick, B., Norris, J. M., & Smith, J. S. (2018, December). Dendra: A Real-time Cloud-based Time-series Curation System. In AGU Fall Meeting Abstracts.
56. Lombardo, L., Corbellini, S., Parvis, M., Elsayed, A., Angelini, E., & Grassini, S. (2017). Wireless sensor network for distributed environmental monitoring. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 67(5), 1214-1222.
57. Klein, L., Bermudez, S., Schrott, A., Tsukada, M., Dionisi-Vici, P., Kargere, L., ... & Leona, M. (2017). Wireless Sensor Platform for Cultural Heritage Monitoring and Modeling System. Sensors, 17(9), 1998.
58. D'Alvia, L., Palermo, E., Rossi, S., & Del Prete, Z. (2017). Validation of a low-cost wireless sensors node for museum environmental monitoring. ACTA IMEKO, 6(3), 45.
59. Corbellini, S., Di Francia, E., Grassini, S., Iannucci, L., Lombardo, L., & Parvis, M. (2018). Cloud based sensor network for environmental monitoring. Measurement, 118, 354-361.
60. Canosa, E., & Norrehed, S. (2019). Strategies for Pollutant Monitoring in Museum Environments.
61. Bertolin, C. (2019). Preservation of Cultural Heritage and Resources Threatened by Climate Change.
62. Bonora, A., Fabbri, K., & Pretelli, M. (2019). Environmental Microclimate Management and Risk in the Unesco World Heritage Site of Villa Barbaro Maser (italy). ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4211, 269-276.
63. Indrie, L., Oana, D., Ilieş, M., Ilieş, D. C., Lincu, A., Ilieş, A., ... & Marcu, F. (2019). Indoor air quality of museums and conservation of textiles art works. Case study: Salacea Museum House, Romania. Industria Textila, 70(1), 88-93.
64. Elhariri, E., & Taie, S. A. (2019, February). H-Ahead Multivariate microclimate Forecasting System Based on Deep Learning. In 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE) (pp. 168-173). IEEE.
65. Pereira, L. D., Gaspar, A. R., Costa, J. J., & Pereira, G. (2019). The importance of long-term hygrothermal assessment of museum spaces: method and application in a permanent exhibition in a historical building. Conservar Património, 30, 92.
66. Pigliautile, I., Castaldo, V. L., Makaremi, N., Pisello, A. L., Cabeza, L. F., & Cotana, F. (2019). On an innovative approach for microclimate enhancement and retrofit of historic buildings and artworks preservation by means of innovative thin envelope materials. Journal of Cultural Heritage, 36, 222-231.
67. 1Campbell, B. A., & Baars, C. (Eds.). (2019). The Curation and Care of Museum Collections. Routledge.
68. Rodwell, H. (2019). Preserve, Protect, and Defend: A Practical Guide to the Care of Collections.
69. Bratasz, L., White, T., Butts, S., Sease, C., Utrup, N., Boardman, R., & Simon, S. (2018). Toward Sustainable Collections Management in the Yale Peabody Museum: Risk Assessment, Climate Management, and Energy Efficiency. Bulletin of the Peabody Museum of Natural History, 59(2), 249-269.

Monitoraggio delle collezioni e delle opere d'arte

70. Zhang, L., Xie, J., Qinc, L., Liu, Z., & Liu, G. (2019). A Monitoring Method of Color Decaying for Colored Patterns in Architectural Heritage. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42(2/W11).
71. Mirabella Roberti, G., Nannei, V. M., Azzola, P., & Cardaci, A. (2019). Preserving the Venetian Fortress of Bergamo: quick photogrammetric survey for conservation planning.

72. Baratin, L., Gasparetto, F., Moretti, E., & Pisani, L. (2018). Post-earthquake cultural heritage rehabilitation. The digital and integrated management of artwork from Amandola (FM), Italy. In Le Vie dei Mercanti XVI International Forum di Studi (pp. 1-9). Gangemi.
73. Palma, G., Pingi, P., Siotto, E., Bellucci, R., Guidi, G., & Scopigno, R. (2019). Deformation analysis of Leonardo da Vinci's "Adorazione dei Magi" through temporal unrelated 3D digitization. Journal of Cultural Heritage.
74. Gimat, A., Schoeder, S., Paris, S., Thoury, M., & Dupont, A. L. Separative and Spectroscopic Monitoring of the Degradation of Historical Paper after Synchrotron X-ray Exposure.
75. Bastidas, D. M., & Cano, E. (Eds.). (2018). Advanced Characterization Techniques, Diagnostic Tools and Evaluation Methods in Heritage Science. Springer.
76. Mari, M., Tsafas, V., Melessanaki, K., & Filippidis, G. (2018). Applications of non-linear imaging microscopy techniques to cultural heritage objects. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 60(12), 663-669.
77. Aste, N., Adhikari, R. S., Buzzetti, M., Della Torre, S., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2019). Microclimatic monitoring of the Duomo (Milan Cathedral): Risks-based analysis for the conservation of its cultural heritage. Building and Environment, 148, 240-257.
78. Ceccarelli, S., Guarneri, M., Ferri de Collibus, M., Francucci, M., Ciaffi, M., & Danielis, A. (2018). Laser Scanners for High-Quality 3D and IR Imaging in Cultural Heritage Monitoring and Documentation. Journal of Imaging, 4(11), 130.
79. Balbo, A., Zanotto, F., Cristina, C., Carla, M., & Monticelli, C. (2018). Influence of alloying elements and phase composition in the corrosion behaviour of bronze protected by organosilane coatings. In 69th Annual ISE Meeting (pp. 1-1). ISE-International Society of Electrochemistry.