



UNIVERSITÀ DI PISA

Memoria scritta
Audizione del 1 Febbraio 2024

Senato della Repubblica

8ª Commissione permanente

Ambiente, transizione ecologica, energia, lavori pubblici,
comunicazioni, innovazione tecnologica

Indagine conoscitiva sull'utilizzo delle tecnologie digitali e dell'intelligenza artificiale nella pianificazione, nella costruzione e nel monitoraggio delle infrastrutture stradali, autostradali, ferroviarie, portuali e aeroportuali e logistiche

A cura di

- Prof. Antonio Cisternino
Presidente del Sistema Informatico di Ateneo
- Prof. Vincenzo Gervasi
Dipartimento di Informatica
- Prof. Walter Salvatore
Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale
Presidente Consorzio FABRE

La riduzione dei rischi infrastrutturali come occasione di sviluppo del Paese

Le strutture civili, e in particolare le infrastrutture civili, soprattutto quelle dei trasporti, rivestono un ruolo fondamentale nella vita sociale ed economica del paese. Oltre al diretto danno tecnico, un disastro, o solo anche una perdita della capacità di trasporto, ha forti conseguenze sul trasporto stradale e la distribuzione di traffico. Il nostro patrimonio infrastrutturale risale in buona parte al primo dopoguerra con un numero crescente di strutture soggette a un continuo degrado dei materiali a fronte di un volume di traffico ampiamente più elevato rispetto alle condizioni di progettazione iniziale. Ciononostante, il livello di attenzione allo stato di conservazione e di manutenzione non sempre risulta adeguato, basti ricordare i numerosi crolli importanti di ponti (non dovuti a calamità naturali) nel recente passato, con conseguenti morti e danni materiali ed economici.

In questo quadro generale, appare necessario avviare un progetto di censimento, controllo e valutazione del livello di rischio delle opere infrastrutturali nel più breve tempo possibile, individuando quelle strategiche ad elevata criticità e definendo le priorità degli eventuali interventi di messa in sicurezza sì da pervenire ad una progressiva riduzione dei rischi utilizzando in maniera ottimale le risorse disponibili.

Nel 2020, il Ministero delle Infrastrutture ha prodotto nuove linee guida per la “Classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti”. Le procedure ivi contenute definiscono un nuovo approccio per la gestione del patrimonio infrastrutturale di ponti e viadotti. Analoghe Linee Guida sono state approvate per le gallerie esistenti. L’approccio proposto si basa sulla valutazione del livello di attenzione dell’opera, al fine di determinarne la necessità di valutazioni accurate, di monitoraggio o di interventi di adeguamento.

La loro applicazione prevede chiaramente l’individuazione e implementazione di tecnologie, prassi, sistemi intelligenti in grado di favorire e velocizzare l’opera di classificazione dei livelli di rischio e di monitoraggio dei ponti, viadotti e gallerie (e delle opere d’arte infrastrutturali in generale), che risulta particolarmente complessa e richiede tempi consistenti e di fornire elementi probanti per i decisori sulle priorità manutentive ordinarie e straordinarie (se non sostituzione) degli stessi, nonché di operatività e transitabilità.

L’applicazione della nuova struttura normativa sta quindi promuovendo un rapido sviluppo tecnico e tecnologico con soluzioni sempre più efficaci e accurate in risposta alle menzionate esigenze di conoscenza, controllo e monitoraggio e che fanno ricorso alle più moderne tecnologie nell’ambito della sensoristica, del rilievo strumentale, dell’informatizzazione e dell’intelligenza artificiale, figura 1.

L’utilizzo dell’Intelligenza Artificiale, ad esempio, riveste oggi particolare interesse nell’analisi dei dati riguardanti l’evoluzione nel tempo dei difetti delle infrastrutture, al fine di ottenere informazioni rilevanti per la caratterizzazione dei relativi effetti sulla sicurezza.

L’utilizzo della Robotica e dei metodi di Automazione, d’altro canto, rivestono interesse nella raccolta dati mediante operazioni di cattura autonome e/o semiautonome e operazioni di integrazione delle informazioni raccolte da fonti eterogenee e/o mobili.

Le nuove tecnologie stanno quindi progressivamente sostituendo i tradizionali strumenti di rilievo, indagine, controllo e monitoraggio delle strutture e delle opere d’arte infrastrutturali.

Ulteriori sviluppi sono sicuramente possibili grazie all'integrazione dei metodi di rilievo e monitoraggio utilizzando i più moderni approcci per la sensorizzazione e analisi dati con modelli meccanici e analisi affidabilistiche che, utilizzando modelli previsionali dei fenomeni evolutivi, consentono la stima in tempo reale dei livelli di sicurezza della costruzione e quindi della sua vita utile.



Figura 1 – La conoscenza delle opere e lo sviluppo tecnologico

In questo contesto è naturale pensare allo sviluppo di un sistema nazionale che sia in grado di organizzare e analizzare i dati disponibili seguendo il flusso logico disegnato dalle stesse LL. GG. Tale sistema deve essere modulabile e integrabile negli scopi per ciascuno dei rischi rilevanti e aggiornato nel tempo in funzione dello sviluppo scientifico, tecnologico e applicativo, figura 2.

Una simile linea di sviluppo tecnico e tecnologico consentirebbe una crescita progressiva sia della sicurezza, durabilità e resilienza della nostra rete infrastrutturale, con indubbi vantaggi economici e sociali per il Paese, ma anche una crescita dell'intero settore delle infrastrutture, aggiungendo sempre nuove competenze alle diverse discipline coinvolte e quindi ai tecnici ed alle imprese coinvolti.

L'adozione di nuove tecniche per la documentazione del processo di invecchiamento consente, inoltre, non solo una migliore comprensione della creazione e dell'evoluzione dei difetti ma anche di produrre dei modelli del danno utili ad avere una stima più accurata dei rischi. Difatti mentre da un lato è noto che il rischio di una attività possa essere stimato solo conoscendo anteriormente il livello di danno e la probabilità dell'evento, nel caso delle reti di trasporto questi fattori dipendono in maniera complessa da elementi correlati quali: il livello di esercizio, l'invecchiamento, i cambiamenti climatici e ambientali, ... Uno degli obiettivi sociali dell'iniziativa è quello di produrre una più alta conoscenza delle condizioni di sicurezza delle strutture civili e delle reti di trasporto a beneficio sia degli operatori e degli utilizzatori.

Da un punto di vista economico, lo sviluppo di tecnologie e metodi di conoscenza e documentazione, ma anche di personale preparato ad esercitarli, può portare nel medio periodo a un uso consapevole delle risorse in uno scenario, purtroppo, come quello della manutenzione di risorse vincolate e limitate. I vantaggi diretti sono di diversi tipi, quali: la capacità di produrre piani di manutenzione mirati, la capacità di predire e monitorare il rischio bilanciando risorse e piani strategici di contingenza del rischio, la

capacità di mappare a livello geografico le capacità di resilienza della rete di trasporti limitando le criticità.

L'introduzione di un approccio sempre più moderno per la classificazione, controllo, valutazione e sorveglianza delle infrastrutture, in sintesi, non solo consente una razionale e ottimale riduzione dei rischi rilevanti in funzione delle risorse disponibili ed un'immissione di risorse sul territorio, favorendo l'impiego dei tecnici e delle imprese del settore, ma favorisce anche un ritorno stabile in termini di competenze e di competitività delle imprese e di sicurezza, durabilità e resilienza delle infrastrutture.

Lo scenario tecnologico

L'approccio previsto dalle Linee Guida prodotte dal Ministero delle Infrastrutture introduce nuove metodiche di analisi e tecniche per individuare il livello di rischio per ciascuna opera, al fine di determinare la necessità di analisi e valutazioni più accurate, di monitoraggi continui ovvero la necessità di intervento immediati per il ripristino delle condizioni di sicurezza. Tali analisi, attualmente compiute tramite ispezioni visive, includono l'individuazione di "schemi di difettosità" correlati eventualmente allo sviluppo di meccanismi di collasso. Attualmente tali ispezioni (processo di conoscenza) sono condotte da tecnici qualificati e con tecniche di indagine tradizionali, prevalentemente manuali, e sebbene talvolta sia disponibile il supporto di nuovi strumenti tecnologici (ad esempio LiDAR, Droni,...) molto lavoro manuale risulta necessario per procedere alla integrazione delle informazioni, alla raccolta accurata dei dati ed alle elaborazioni successive, in un processo necessario ma comunque impegnativo in termini di risorse, tempo e rischio di errore.

In questo scenario, è necessario sviluppare ricerca e soluzioni tecniche e tecnologiche al fine di realizzare sistemi per il censimento, l'ispezione, la classificazione, il controllo, la sorveglianza e il monitoraggio delle infrastrutture esistenti con particolare riferimento, ma non solo, a ponti, viadotti, gallerie, infrastrutture stradali, costruzioni idrauliche e marittime.

Le nuove tecnologie stanno progressivamente sostituendo gli strumenti di raccolta dati tradizionali. Ad esempio, l'uso combinato di droni, sistemi di localizzazione globale (GNSS) e dispositivi portatili (tablets) offre la possibilità di verificare immediatamente durante la cattura dei dati la qualità della mappatura e la corrispondente geo-referenziazione. Un saggio uso di queste tecnologie consente al tecnico esperto di determinare su quali elementi, strutture o specifiche localizzazioni debba essere prodotta un'indagine più accurata con sensori integrativi.

Le tradizionali ispezioni in-situ, altamente dispendiose in termini di costo e tempo, possono quindi essere assistite dalle tecnologie e tradotte in tecniche di analisi di gemelli digitali in grado di riosservare e riprendere la visione di particolari a distanze spaziali e temporali che possono coprire anche i periodi inter-visita (es. semestrali) in modo da monitorare l'evoluzione dei fenomeni di danneggiamento e degrado e delle azioni antropiche e naturali che interessano la struttura.

In questo contesto sono stati recentemente sviluppati sistemi di raccolta ed analisi dati importanti per la stima dei danni e la mitigazione dei disastri. Sistemi di sensorizzazione innovativi includono diversi tipi di camere (ottiche, ad alta frequenza, infrarosso, termiche e di profondità) e di rilevatori morfologici (LiDARS). Tali sensori possono essere sia fissi (ad esempio camere ad alta frequenza per analisi dei movimenti) che mobili, integrati spesso con droni, veicoli autonomi e braccia robotizzate, per l'acquisizione di geometrie, di informazioni grafiche e l'analisi di superfici e difetti estesi in strutture di

grasse dimensioni. Diverse tecniche sono state progettate per la fusione di informazioni geometriche (3D point cloud) e grafiche (immagini) quando raccolte da veicoli mobili in grado di navigare intorno alla struttura in maniera autonoma, semi-supervisionata o tramite modalità di pilotaggio remota. La combinazione della robotica con nuove tecniche di Computer Vision possono consentire lo sviluppo di modelli geometrici accurati con elevata risoluzione, figura 2.

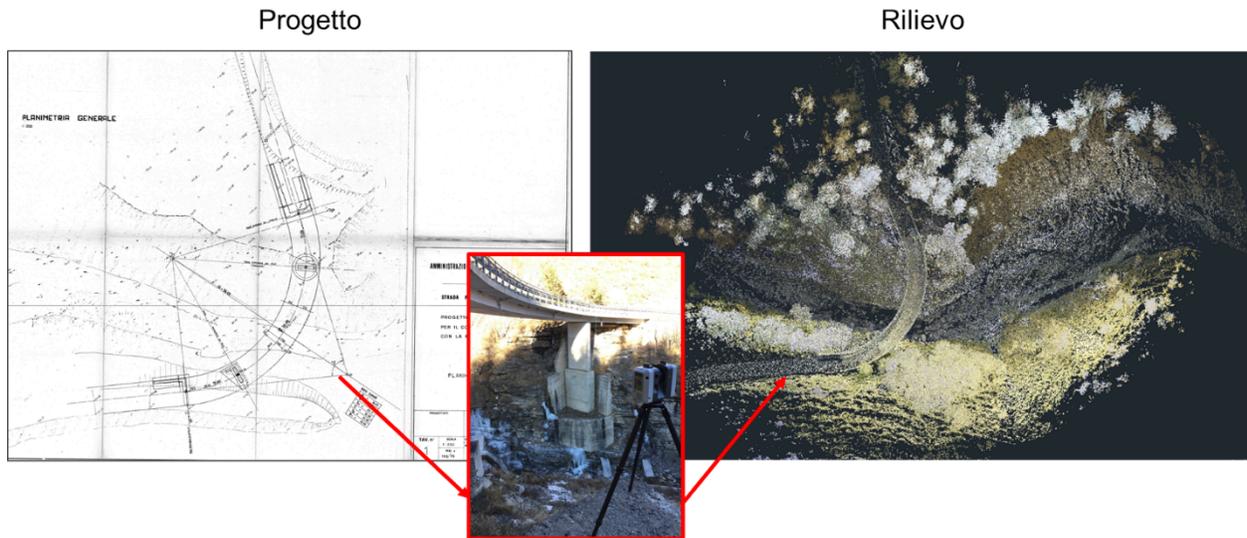


Figura 2 – Ricostruzione georeferenziata del ponte di Monesi (IM)

Lo sviluppo e l'utilizzo di nuove tecniche di acquisizione e analisi dei dati, oltre al considerevole guadagno in termini di chiusure temporali di esercizio per ispezione, rischi procedurali durante i controlli, i rischi di acquisizioni incomplete, i tempi di acquisizione e la riduzione dei fattori umani nella determinazione delle procedure, consentono il raggiungimento di una scala più uniforme ed indipendente dalla specifica valutazione umana nella valutazione dei difetti.

La ricerca corrente nel settore sta iniziando ad applicare tecniche di classificazione e stima evolute ai dati raccolti sul campo, per la determinazione dell'entità delle tipologie di danni più ricorrenti (ad esempio le crepe) nonché per la calibrazione ed aggiornamento di modelli meccanici e strutturali e per la valutazione dei livelli di sicurezza strutturale.

Sono in via di sviluppo metodi innovativi di ricerca e raccolta dati delle infrastrutture per la definizione di modelli geometrici, l'analisi dei dati geomorfologici e la correlazione dei dati raccolti con i dati progettuali. Sarà possibile altresì offrire soluzioni focalizzate su elaborazione delle informazioni e previsione del rischio, acquisizione ed elaborazione delle immagini visive, termiche, radar e acustiche, studio di tecniche di computer vision per l'analisi delle immagini, per la classificazione e la quantificazione delle difettosità, sviluppo di algoritmi AI (per esempio, tramite tecniche di deep learning) per la rilevazione automatica di anomalie e difetti nonché di processi idraulici e geotecnici.

Sono in corso, inoltre, studi e ricerche per lo sviluppo di sistemi in grado di analizzare in tempo reale lo stato delle opere fornendo indicazioni utili alla determinazione della loro vita residua, sui relativi fenomeni di degrado e sulla programmazione delle attività di manutenzione e messa in sicurezza tenendo conto dei diversi rischi rilevanti, tra cui quelli statico-fondazionale, sismico, idraulico e frane. Ciò

sarà possibile affrontando problemi e aspetti di studio e ricerca complementari per la modellazione meccanica di micro, meso e macro-strutture, la caratterizzazione delle proprietà meccaniche di materiali strutturali tradizionali e innovativi, l'analisi dinamica e di stabilità delle strutture, la meccanica sperimentale come verifica dei modelli adottati, l'analisi e la valutazione del rischio strutturale, sismico, idrogeologico e fondazionale delle strutture, lo sviluppo di modelli previsionali dei fenomeni evolutivi rilevanti, il monitoraggio e il controllo delle strutture esistenti, sia nei confronti dei carichi antropici sia dei fenomeni naturali, la sicurezza delle strutture e opere d'arte infrastrutturali, l'integrazione dei dati provenienti dall'analisi e verifica strutturale con quelli del monitoraggio, la progettazione di soluzioni innovative per l'adeguamento delle costruzioni esistenti.

Sebbene alcuni risultati preliminari siano già disponibili, si ritiene che nel prossimo periodo sia atteso un importante sviluppo scientifico per superare alcune delle limitazioni degli approcci attualmente utilizzati.

Il ruolo dell'AI

Nello scenario appena descritto, l'uso di tecniche di Intelligenza Artificiale (AI) occupa un ruolo centrale, sia nell'analisi dei dati grezzi (per esempio, immagini di lesioni, flussi di dati da sensori ambientali, rilevazioni di misure sul campo), sia nella applicazione di modelli previsionali (per esempio, determinazione di classe di rischio secondo i modelli contenuti nelle LL.GG. di cui sopra). Le varie applicazioni, che sono in una fase di rapidissimo progresso tecnico, possono essere classificate in due grandi famiglie: tecniche basate su Apprendimento Automatico (machine learning, ML), in cui a partire da grandi quantità di dati opportunamente raccolti, algoritmi di tipo statistico "apprendono" il comportamento desiderato spesso in maniera non umanamente interpretabile, e tecniche basate su Elaborazione Simbolica (symbolic AI, SAI) in cui sia le regole da applicare (tipicamente definite da esperti nel dominio applicativo, da cui il nome "expert systems"), sia le deduzioni dei sistemi (prodotte da algoritmi sulla base delle regole e di pochi dati del problema), sono espresse in maniera leggibile e umanamente interpretabile.

In entrambi i casi, i sistemi che implementano le tecniche di AI devono ovviamente rispettare quanto previsto dal recente AI Act (la cui entrata in vigore è prevista per il 1° Gennaio 2026, con obbligo dei produttori di conformarsi entro il 1° Gennaio 2029). Ma in aggiunta, considerata la speciale criticità dei settori infrastrutturali coinvolti, è opportuno prevedere alcune ulteriori caratteristiche: fra queste certamente la spiegabilità dei risultati (explainability), che è tecnicamente più semplice per i sistemi SAI ma costituisce un problema scientifico ancora largamente aperto per i sistemi ML, ma anche la conoscibilità, tracciabilità, attribuzione e non-ripudiabilità di tutti gli artefatti che contribuiscono alla decisione finale. Ciò riguarda, fra gli altri, i dataset usati nell'addestramento di sistemi di ML, i modelli finali risultanti da tale addestramento, le regole incorporate da un sistema esperto, il software che applica il modello ML o le regole SAI, i dati di input usati per ogni singola esecuzione degli algoritmi AI, e i corrispondenti risultati di output.

La qualità delle decisioni prese da sistemi AI dipenderà dalla costante evoluzione tecnologica, nell'ambito di processi di miglioramento continuo. Ma perché i risultati degli algoritmi AI siano non solo affidabili in sé, ma anche accettati come tali da tutti gli stakeholder interessati al buon funzionamento delle infrastrutture (e in particolare, dai cittadini che ne sono spesso gli utenti finali), è necessario che le caratteristiche di conoscibilità, tracciabilità, attribuzione e non-ripudiabilità possano essere ottenute in

maniera indipendente da ciascun singolo attore, per esempio attraverso l'uso di sistemi di "distributed ledger" (blockchain) pubblici o semi-pubblici.

Sempre nel contesto di riferimento delle infrastrutture critiche, sarà fondamentale assicurare la resilienza di queste nuove tecnologie dal punto di vista della cyber-security. Infatti, una tematica fondamentale sarà quella di rendere gli artefatti di IA resistenti agli attacchi informatici che possono essere attuati sia sui modelli che sui i dati utilizzati per addestrarli. Oggi si inizia ad avere una sensibilità sul tema e i produttori più avanzati stanno inserendo nei processi di sviluppo della tecnologia metodi per implementare, verificare e validare la sicurezza dei sistemi rispetto ad attacchi portati da attori malevoli.

L'impiego di sistemi di AI generativa, in particolare quella testuale può infine trovare applicazione nell'analisi capillare della documentazione di opere, sia al fine di digitalizzare ed analizzare documentazioni di progetto delle costruzioni esistenti, sia per avere un supporto nell'analisi dei progetti e della loro conformità per le nuove opere. In questo contesto l'Università di Pisa ha sviluppato il sistema Open Source (<https://github.com/Unipisa/Oraculum>) *Oraculum*, per la memorizzazione e gestione della conoscenza in modo che si possa impiegare con modelli di intelligenza artificiale generativa. Il progetto consente di realizzare assistenti intelligenti che privilegino la conoscenza del sistema ma che possano ricorrere alla conoscenza appresa dal modello LLM come ad esempio GPT di OpenAI. Il sistema per ora si concentra sugli aspetti testuali, ma si prevede l'aggiunta di un supporto multimodale che includa anche immagini e audio. Sarà quindi possibile analizzare anche le immagini nella documentazione utilizzando i modelli multimodali di AI generativa a supporto della valutazione progettuale e della gestione della documentazione a supporto del ciclo di vita di un'opera infrastrutturale.

Il Consorzio FABRE e le sue attività

Nel corso del 2020 è stata creato un Consorzio di Ricerca, Fabre Consorzio di ricerca per la valutazione e il monitoraggio di ponti, viadotti e altre strutture, con sede amministrativa presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università di Pisa che include oltre 25 Università ed Enti consorziati o convenzionati a livello nazionale e internazionale (www.consorziofabre.it).

Il Consorzio opera oggi con le maggiori Concessionarie stradali e autostradali italiane e con molte Amministrazioni pubbliche, collabora inoltre attivamente per gli sviluppi metodologici e normativi con ANSFISA e con il MIT.

Il Consorzio promuove e coordina la partecipazione delle Università e degli Enti di Ricerca Consorziati alle attività scientifiche nei settori dell'Ingegneria Civile e dell'Architettura, con particolare riferimento alla valutazione di ponti, viadotti e altre strutture.

In particolare, il Consorzio sta sviluppando:

- nuove tecniche, sistemi e metodologie per la modellazione e l'analisi delle infrastrutture esistenti e del loro contesto con particolare riferimento dei rischi naturali, sismico, frane e idraulico;
- algoritmi di cattura, gestione ed elaborazione dei dati tramite tecniche di robotica e sensoristica avanzata, sistemi autonomi ed intelligenza artificiale;
- una linea di conoscenze contigua con l'ingegneria strutturale e civile che integri sistemi di automazione ed analisi delle opere infrastrutturali con tecniche evolute di modellazione e predizione dei comportamenti e del rischio;

- sistemi di raccolta dati distribuiti per il monitoraggio continuo delle opere esistenti e la generazione di nuovi metodi di sorveglianza assistita.

In questo contesto, FABRE ha stipulato accordi con aziende del settore per lo sviluppo di moduli per l'ispezione, la classificazione, la valutazione, il controllo, la sorveglianza e il monitoraggio di ponti e viadotti esistenti mediante l'utilizzo di metodologie e algoritmi avanzati, risultato di anni di studi e ricerche nel settore.

In particolare, il Consorzio FABRE collabora con Leonardo S.p.A. e con un gruppo di PMI a livello nazionale per lo sviluppo di una piattaforma integrata per la gestione integrata a più livelli di un insieme di reti infrastrutturali, di una singola rete o di una singola opera, mettendo a sistema i dati sia a livello territoriale per la mappatura dei rischi antropici o naturali, dei trasporti eccezionali e per la programmazione degli interventi di manutenzione e messa in sicurezza sia a livello di singola opera sino a monitorarne, in tempo reale, la vita residua mediante modelli previsionali del degrado e dei rischi interferenti, figura 3.

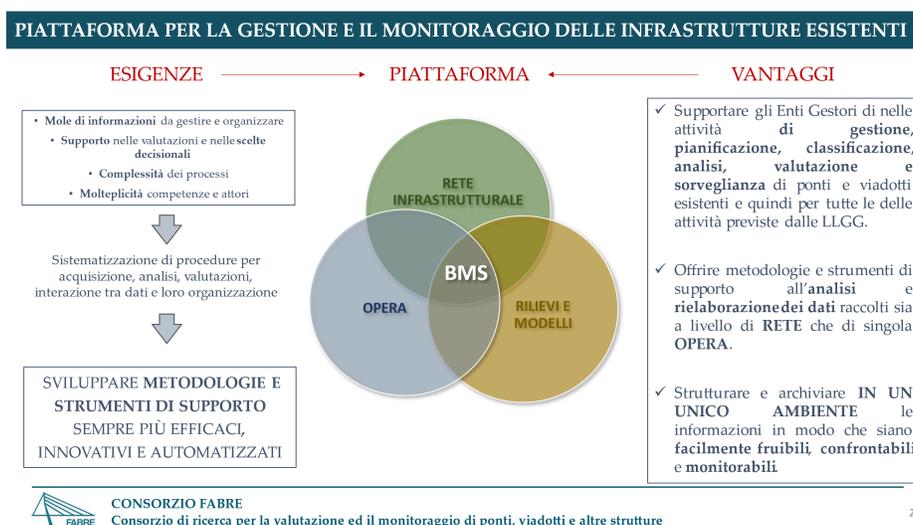


Figura 3 – piattaforma per la gestione delle opere infrastrutturali

A titolo di esempio, la piattaforma è in grado di:

- gestire, analizzare e confrontare dati di monitoraggio a livello territoriale, figura 4;

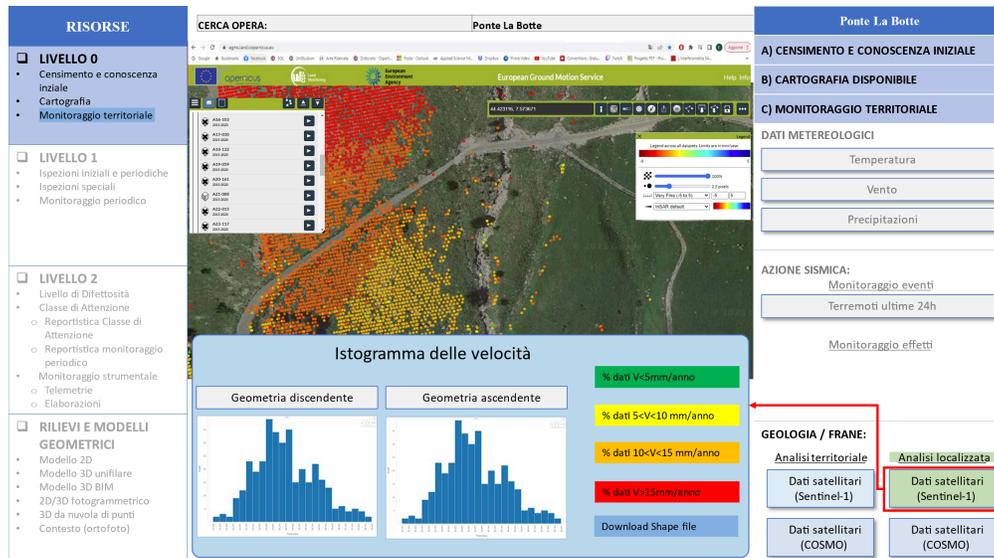


Figura 4 – analisi dati satellitari a livello territoriale per riconoscimento interazione frana - opera

- riconoscere e classificare i difetti strutturali e l'evoluzione dei fenomeni idraulici e franosi nell'ambito delle ispezioni visive delle opere, figure 5, 6, 7 e 8;

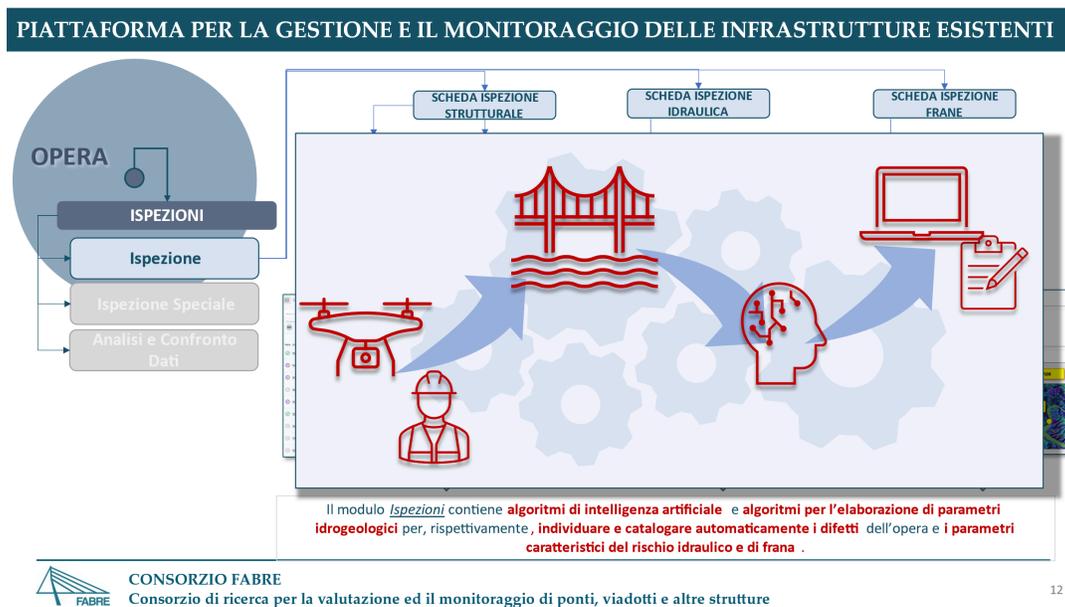
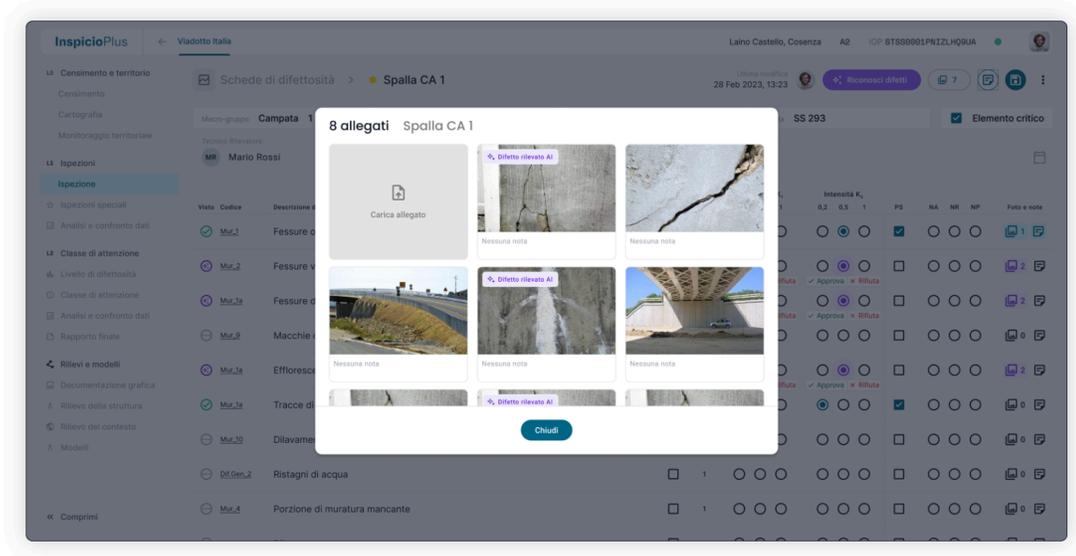


Figura 5 – l'esecuzione delle ispezioni mediante sistemi di rilievo avanzati e utilizzo di IA



Tag sulle immagini che presentano difetti rilevati automaticamente

Figura 6 – riconoscimento difetti mediante IA

PIATTAFORMA PER LA GESTIONE E IL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI



Figura 7 – classificazione difetti mediante IA

PIATTAFORMA PER LA GESTIONE E IL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI

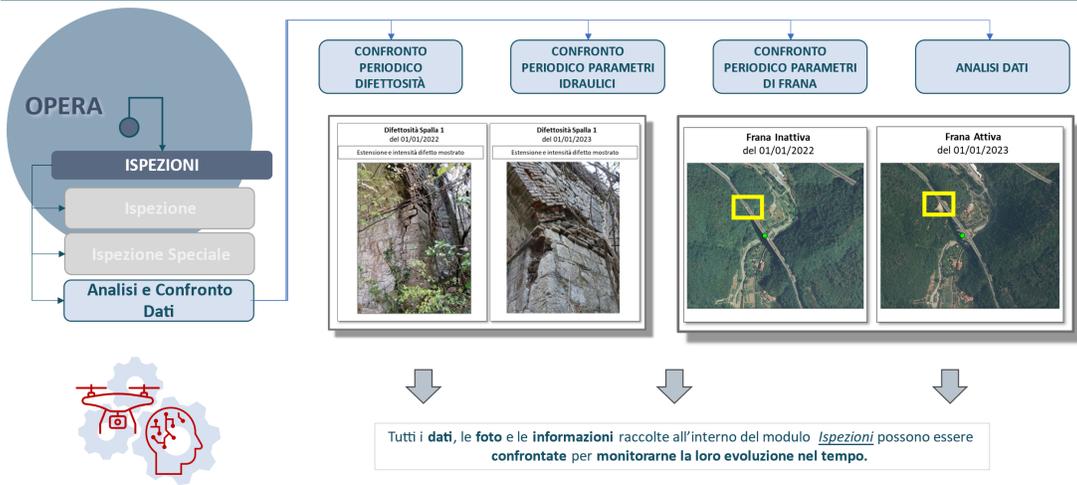


Figura 8 – riconoscimento fenomeni evolutivi mediante IA

- elaborare i dati di sistemi di monitoraggio per il riconoscimento e la localizzazione di eventuali fenomeni evolutivi, figura 9, l'aggiornamento di modelli per la valutazione dell'evoluzione di eventuali fenomeni di danno, figura 10, e la valutazione in tempo reale dell'affidabilità dell'opera e quindi della sua vita residua, anche utilizzando metodi di IA al fine di calibrare e aggiornare i modelli evolutivi di danno e delle azioni antropiche e naturali, figura 11;

PIATTAFORMA PER LA GESTIONE E IL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI

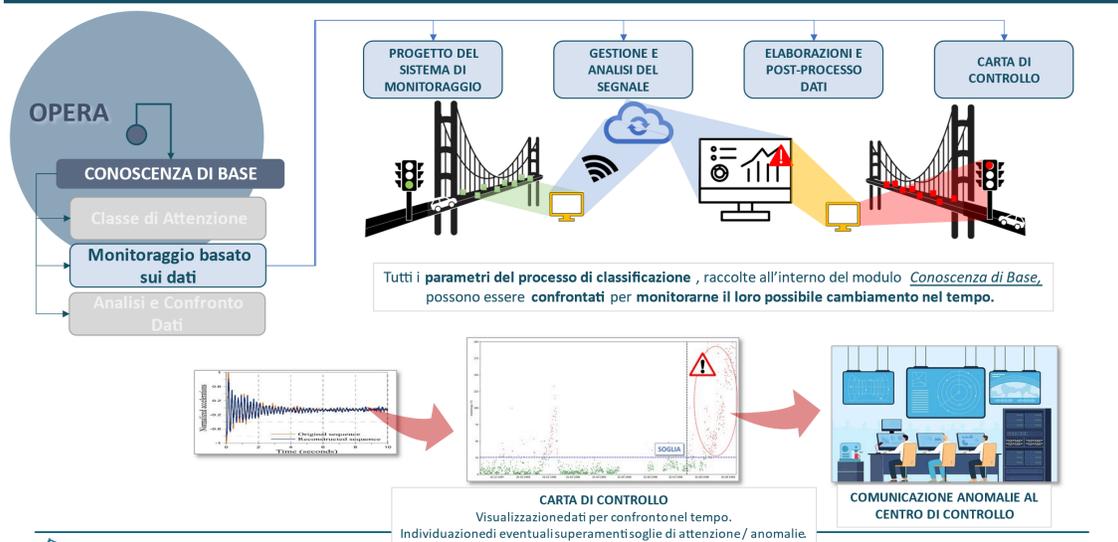


Figura 9 – analisi dei dati dei sistemi di monitoraggio strumentale mediante carta di controllo

PIATTAFORMA PER LA GESTIONE E IL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI

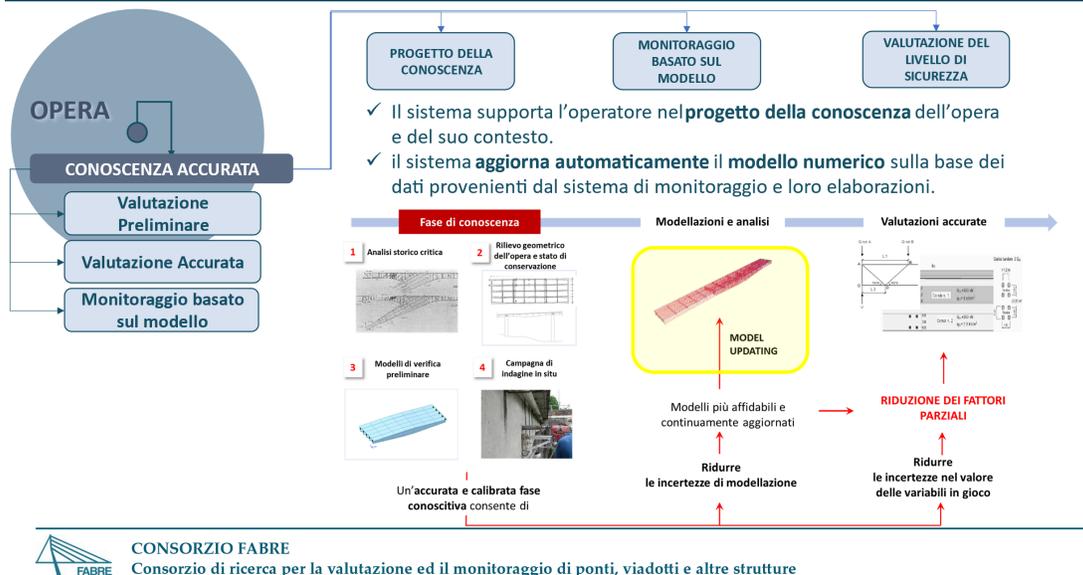


Figura 10 – riconoscimento fenomeni evolutivi mediante IA

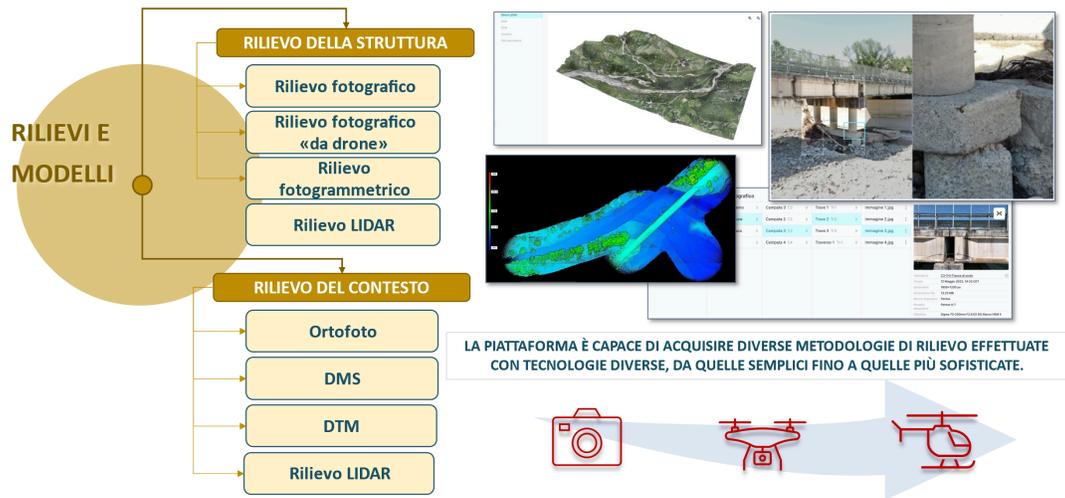
PIATTAFORMA PER LA GESTIONE E IL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI



Figura 11 – valutazione dell'affidabilità strutturale e della vita residua delle opere

- utilizzare metodi di rilievo e di sviluppo di modelli digitali avanzati come base per l'analisi dati, il confronto delle immagini e lo sviluppo dei modelli strutturali, figura 12, 13, 14 e 15.

PIATTAFORMA PER LA GESTIONE E IL MONITORAGGIO DELLE INFRASTRUTTURE ESISTENTI



CONSORZIO FABRE
Consorzio di ricerca per la valutazione ed il monitoraggio di ponti, viadotti e altre strutture

Figura 12 – gestione dei dati di rilievo e dei modelli dell’opera

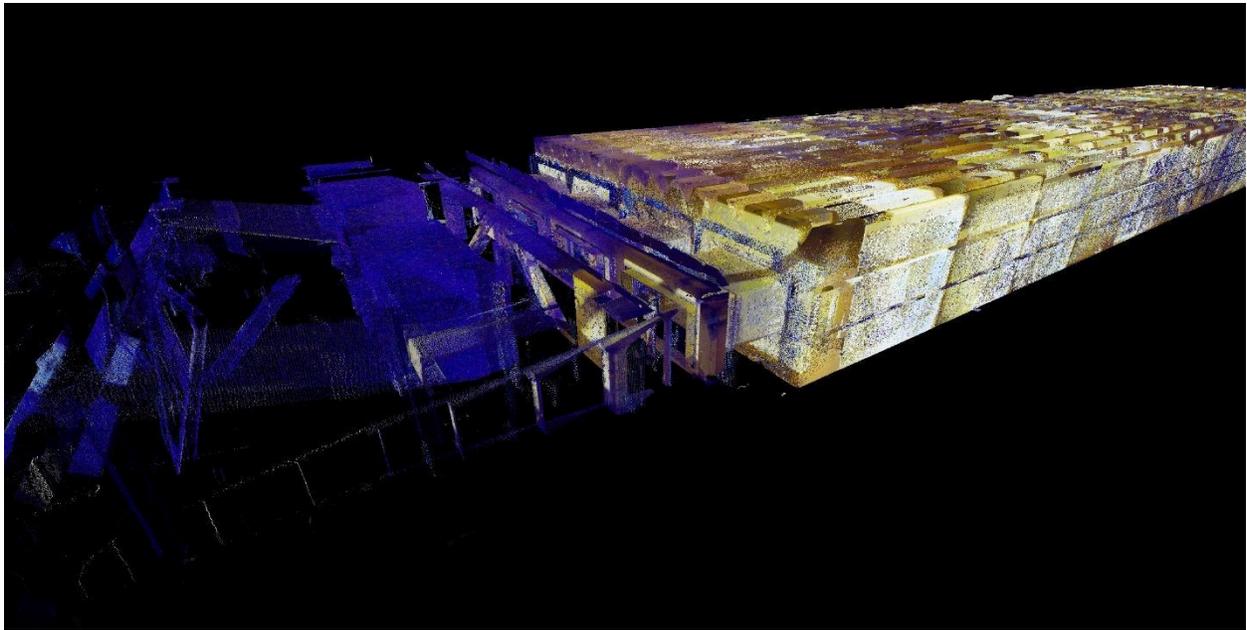
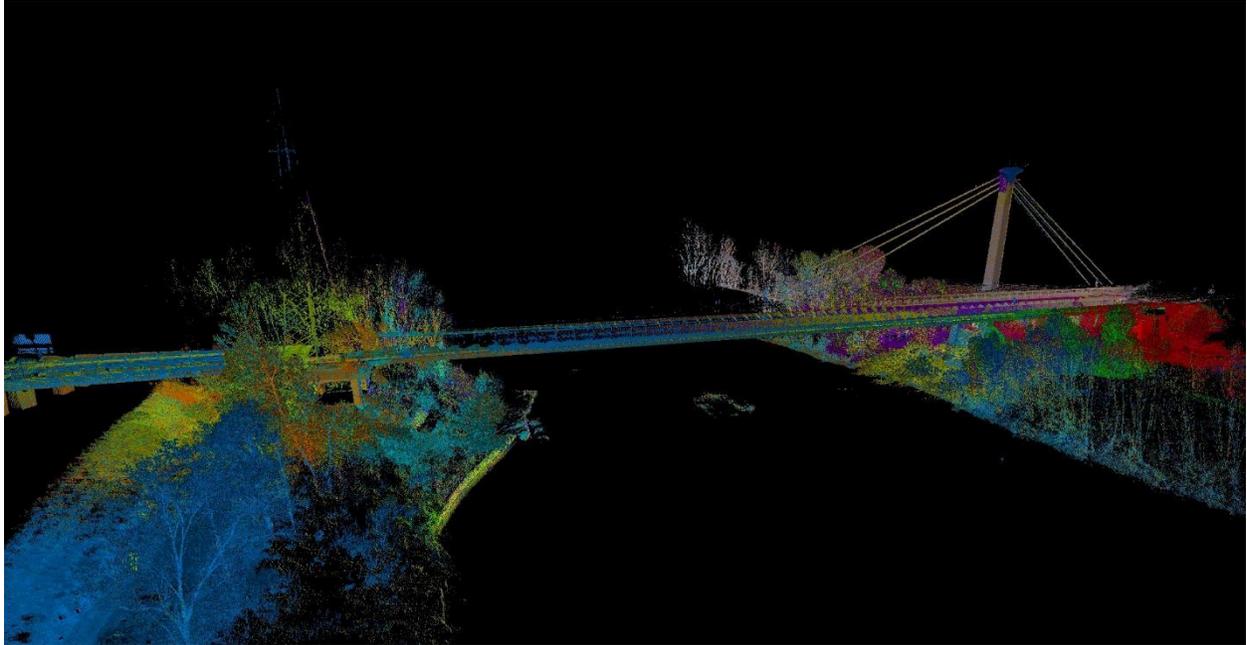


Figura 13 – rilievo con Laser Scanner per ponte di Nassiriya sul Tanaro, Alba (Cuneo)



Figura 14 – rilievo con drone, ponte ferroviario, Chioggia (Venezia)

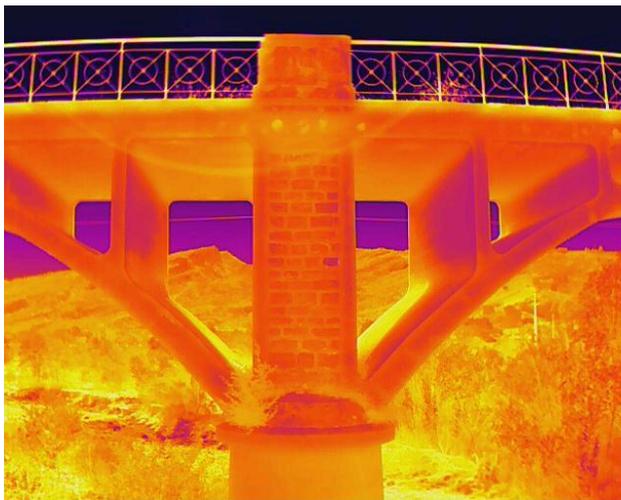


Figura 15 – rilievo con drone con termocamera, ponte stradale Sauro, Provincia di Matera