

II MIRET, verso gallerie resilienti con la trasformazione digitale e la diagnostica integrata

► di Federico Foria*, Gabriele Miceli*, Domenico Chiaino*, Mario Calicchio*

* Ingegneri, ETS Srl

Il mondo muta, i sistemi urbani e i collegamenti tra essi si evolvono. In questo scenario, il rapporto-conflitto tra uomo e natura acquisisce sempre maggiore centralità nel mondo dell'edilizia e delle infrastrutture. L'impero delle costruzioni, la potenza grigia, è tra i più impattanti settori produttivi in termini di *carbon footprint* (circa 11%), di cui il 60% "solo" tra calcestruzzo e acciaio, contando l'estrazione di materie prime, la produzione e il trasporto. La CO₂ prodotta dall'industria dei cementi (5%) impatta, ad esempio, quasi quanto l'agricoltura (5,2%) e poco meno dell'intera produzione di Oil and Gas (6,4%) ⁽¹⁾ ⁽²⁾.

L'impatto non cambia se si parla di nuove costruzioni o manutenzione ad opere esistenti, per questo la chiave di volta risiede nei meccanismi di gestione dei sistemi. La trasformazione digitale, la diagnosi integrata e multidisciplinare ad opera di specialisti di alto profilo, e l'impiego di tecnologie avanzate sono pietre miliari necessarie nella direzione di città resilienti.

In questo scenario, il valore imprescindibile delle infrastrutture emerge sempre più forte come elemento per unire le persone, i luoghi e le economie. Questa è la storia di come i "giganti lineari" sono diventati, da elemento di disparità, soluzioni strategiche cruciali per l'unione. In questo scenario troviamo gli elementi più complessi e aleatori che compongono l'infrastruttura: le gallerie.

Gestione e manutenzione dei tunnel

La pianificazione delle risorse, degli ambienti e la gestione delle gallerie esistenti sono una sfida centrale per i Paesi industrializzati. L'esito positivo di tale sfida, che si incentra sul far coesistere e collaborare la sostenibilità ambientale e una crescita esponenziale della tecnologia, dipende in modo significativo dal fatto che gli obiettivi siano articolati con successo in modo comprensibile, visibile e completo, e basati su dati chiari, ripetibili e oggettivi. Questo quadro generale è fondamentale per poter attuare una strategia finalizzata alla gestione del patrimonio esistente da parte di tutti gli attori coinvolti nell'intero ciclo di vita dell'opera.

Un passo in avanti fondamentale sarà quello di attri-

buire, soprattutto nella fase di esercizio, un ruolo fondamentale all'utente, come singola persona, gruppo di persone, aziende che utilizzano e gestiscono l'infrastruttura, e ambiente in cui essa è calata e interagisce. L'utente assolve a un ruolo socio-economico più urgente che richiede maggiore trasparenza e l'eventuale coinvolgimento nel tavolo decisionale; ciò è possibile solo con processi comprensibili e oggettivi. Tuttavia, non è ancora consueta una gestione attenta ed efficace delle gallerie che includa tutti gli attori e tutte le attività relative all'ispezione, pianificazione, progettazione, costruzione e manutenzione. Pertanto, una corretta gestione richiederebbe un approccio organizzato e sistematico per valutare e analizzare tutte le informazioni acquisite.

In questa direzione si sta muovendo ETS srl, con un nuovo approccio basato su decisioni logiche e coordinate in un ambiente digitale e multidisciplinare. La creazione di tale scenario richiede una rete fitta di attori e una concentrazione elevata di risorse economiche, intellettuali e tecnologiche. Il punto di sintesi di questo complesso meccanismo è il **MIRET** (*Management and Identification of the Risk for Existing Tunnels*), ovvero *Identificazione e Gestione del Rischio*



Figura 1 – Puzzle-chart della metodologia e delle milestones del MIRET

per le Gallerie Esistenti. Il MIRET è una metodologia, un processo e una tecnologia per la digitalizzazione, la progettazione e la gestione, digitale e integrata, di gallerie esistenti. Ma il MIRET è innanzitutto una nuova filosofia “del costruire”, che ha conquistato la fiducia di esperti internazionali dell’ingegneria geotecnica che ne hanno premiato il valore con il titolo di migliore innovazione digitale ai *Ground Engineering*

Awards 2020 (Digital Innovation), diventando un’estensione naturale nell’approccio a diversi progetti e flussi, dal dissesto idrogeologico al rischio alluvioni. Il processo combina innovativi sistemi di rilievo multidimensionale mobile mapping, analisi geotecniche e strutturali, intelligenza artificiale e analisi di rischio, in uno spazio comune di lavoro a servizio del tavolo tecnico e gestionale, per puntare ad un siste-

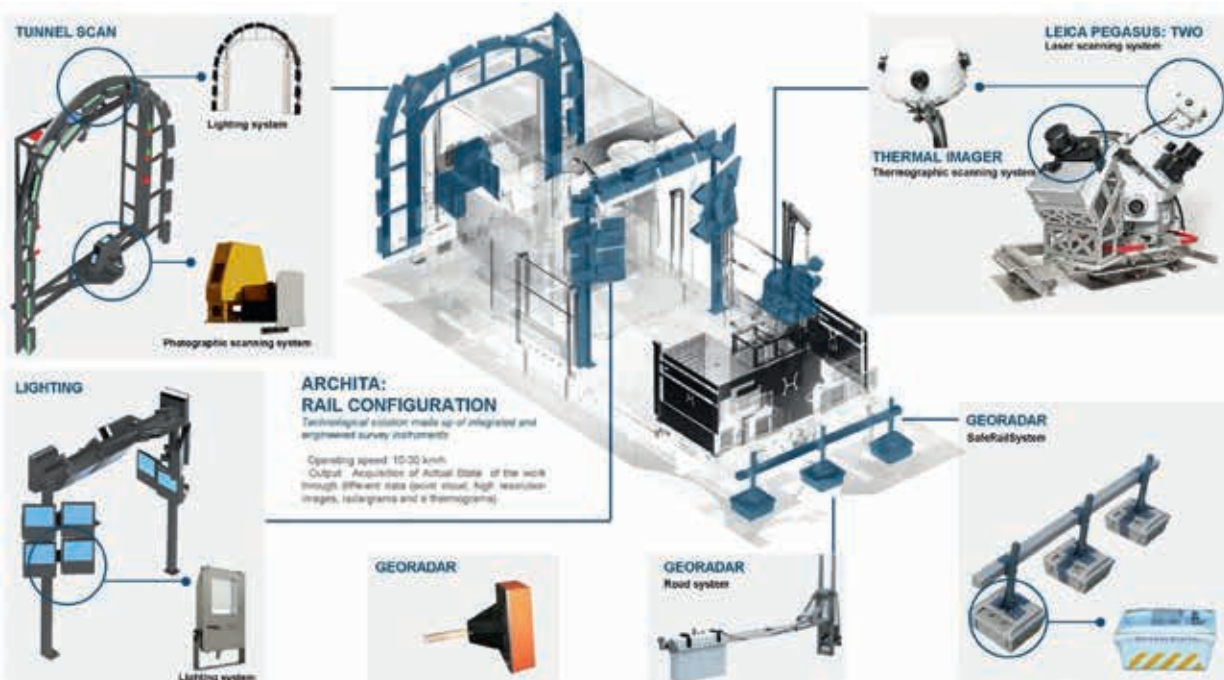


Figura 2 – Sistema ARCHITA: Sensori

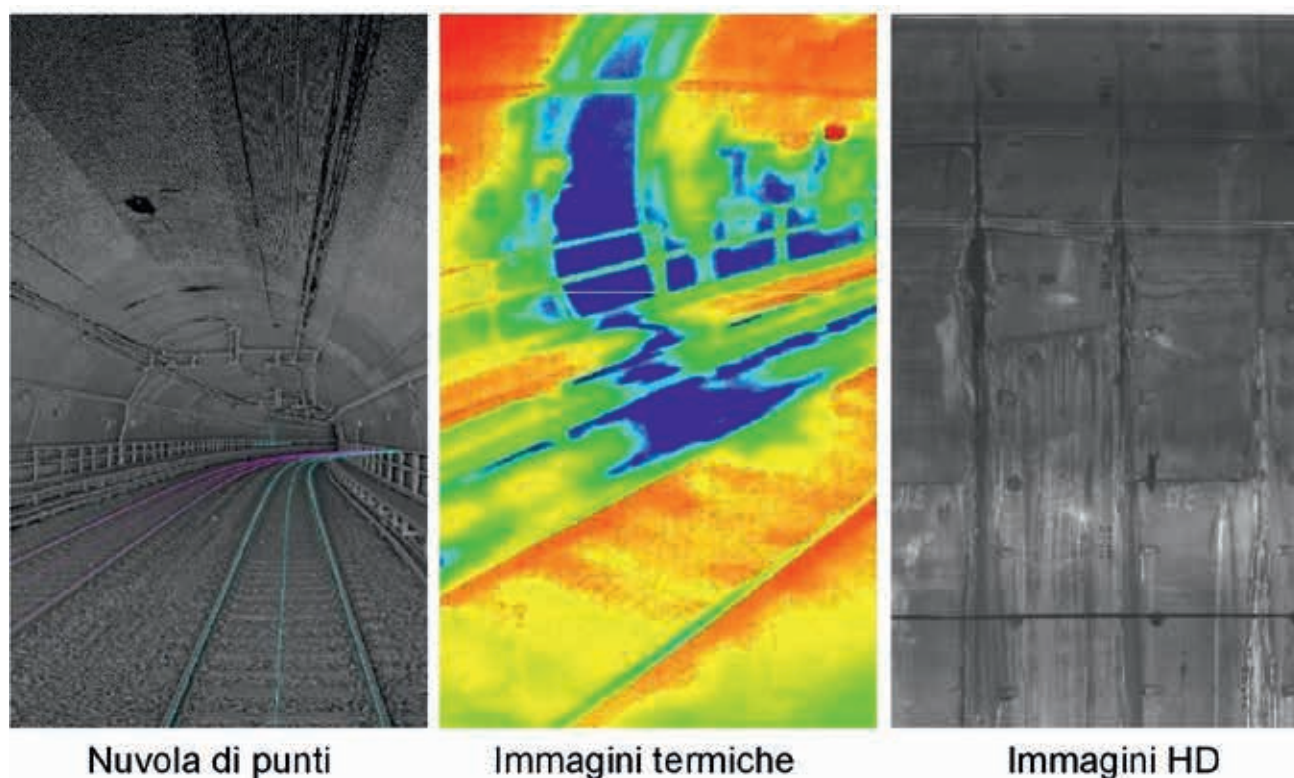


Figura 3 – Sistema ARCHITA: Acquisizioni

ma trasparente, smart e sostenibile, per la pianificazione, la progettazione e la manutenzione delle gallerie. L'approccio generale è incentrato in un flusso di lavoro integrato in grado di collegare e manipolare i dati di indagine-ispezione nel tempo, standardizzando i processi e i linguaggi. Proprio da qui parte il nostro viaggio nel MIRET, dai rilievi, dalle indagini e dalle ispezioni.

Rilievo e Ispezione (SI)

L'attuale sistema di sorveglianza delle gallerie si basa su ispezioni visive, normalmente condotte a piedi o su carrello in regime di interruzione, parziale o totale, della circolazione. Questo da un lato comporta una maggiore attenzione nei confronti dell'opera, dall'altro crea una situazione di disagio, per gli utenti che sono esclusi dall'utilizzo dell'infrastruttura, per gli operatori, con rischio elevato per la propria sicurezza, ed infine per i gestori, che devono affrontare un elevato dispendio di risorse.

Le tecnologie più recenti consentono il rilevamen-

to e l'ispezione di gallerie e infrastrutture con Mobile Mapping. Tali sistemi possono funzionare a diverse velocità, a seconda della precisione e dell'accuratezza che si vuole ottenere e in base alle finalità ingegneristiche e gestionali. Il *Mobile Mapping* può contare su grandi vantaggi in termini di velocità, efficienza e sicurezza, riducendo i tempi di stazionamento sulla linea e spostando l'attività in *back office*.

In questo scenario, ETS srl ha sviluppato un sistema Mobile Mapping proprietario: ARCHITA⁽³⁾, che in un unico passaggio acquisisce dati georeferenziati da diversi sensori installati su un veicolo in movimento, e, mediante l'impiego di opportune tecniche di post-processing, permette di ottenere un numero consistente di informazioni rappresentative dello stato di fatto delle opere.

ARCHITA (figura 2) è un sistema multidimensionale, ideale per il rilievo di infrastrutture lineari, che permette di acquisire informazioni simultanee e integrate con l'impiego di diverse tecnologie, quali: la-

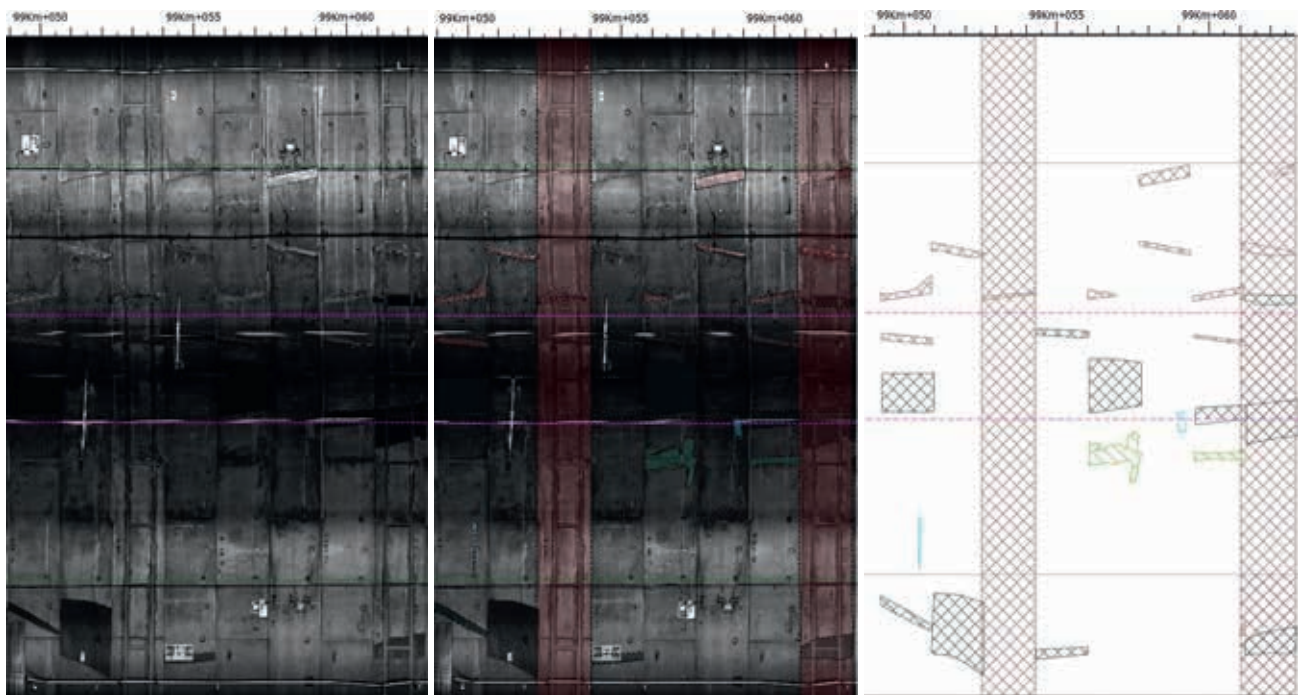


Figura 4 – Processo di analisi dei difetti e relativo output grafico di un settore della galleria

ser scanner, georadar, termocamere e fotografie ad alta definizione (figura 3).

L'acquisizione dei dati avviene con limitato disturbo della circolazione del traffico, in quanto il sistema permette di rilevare l'intera galleria a velocità sostenuta (*i.e.* 15-30 km/h) con un unico passaggio.

La ricostruzione di geometria e stato di consistenza della galleria avviene con dati più oggettivi, chiari e ripetibili. Questi presupposti sono fondamentali per la fase di rilievo e ispezione, spesso all'apice nel processo MIRET, in quanto ripetibile con ciclicità, o in fase di *post operam*, per raccogliere e analizzare i dati in diversi istanti temporali. Solo in questo modo l'ispezione riesce a diventare uno strumento di monitoraggio dello stato dell'opera d'arte per attuarne un'analisi predittiva e oggettiva.

Analisi dei difetti (DA)

Il sistema di acquisizione fotografico installato su ARCHITA, costituito da n. 3 camere lineari ad alta risoluzione e sistema di 16 luci LED, consente di ottenere una ricostruzione fotografica ad alta risoluzione del rivestimento della galleria e di effettuare, *a posteriori*, un'analisi dei difetti di dettaglio.

Strumenti chiave di tale processo sono i cataloghi dei difetti ed il relativo algoritmo di combinazione dei parametri considerati, al fine di giungere ad indici sintetici rappresentativi dello stato di fatto dell'opera. Al giorno d'oggi c'è una grande varietà di cataloghi e metodi tra i committenti. Si riscontrano molte differenze nelle scelte decisionali e più in generale nel sistema di gestione e pianificazione delle infrastrutture.

Nel MIRET gli strumenti chiave sono gli stessi, ma i diversi cataloghi e metodologie adottati dai committenti sono unificati in uno standard unico, che si pone come sistema di ordine, piuttosto che come ulteriore strumento in aggiunta a quelli disponibili. Successivamente i difetti sono digitalizzati attraverso uno specifico ambiente software in modo da ottenere output in formati digitali standard (figura 4), pronti per essere integrati nelle fasi successive.

Il dato digitalizzato può essere integrato con quello delle prove puntuali e delle ispezioni tradizionali. I difetti sono elaborati statisticamente e combinati per ottenere indici di facile lettura, sia per l'intera galleria, sia per settori della stessa (figura 5).

L'acquisizione dello stato di fatto e la mappatura digitale dei difetti rientrano, nel processo MIRET, nel

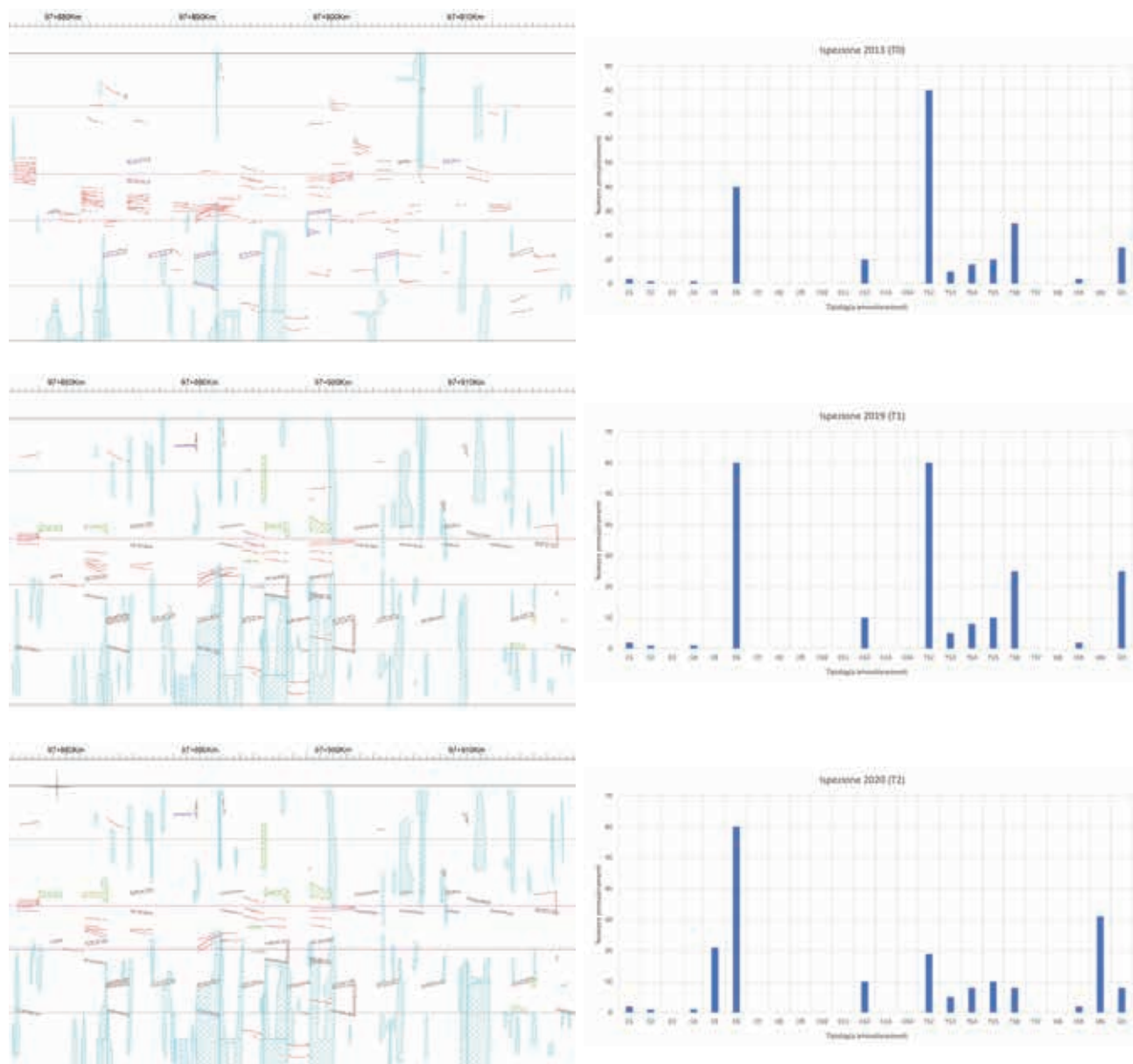


Figura 5 – Confronto del numero di ammaloramenti, di un settore della galleria, delle ispezioni effettuate

flusso di lavoro standardizzato, ripetibile e oggettivo che consente un confronto temporale. Tali confronti consentono, inoltre, di generare modelli su cui basare una manutenzione predittiva fondamentale nell’ottica della pianificazione e della gestione delle risorse. Il processo diagnostico diventa così ripetibile e automatizzabile. ETS srl ha scelto di investire nello svi-

luppo di algoritmi di Intelligenza Artificiale (IA) per il rilevamento dei difetti (4). Ad oggi, tale algoritmo è in grado di rilevare e segmentare i difetti legati alla presenza di acqua, di fessure e di distacchi nelle gallerie scavate in meccanizzato con rivestimento in conci prefabbricati. Lo sviluppo parte dall’implementazione Crack Se-

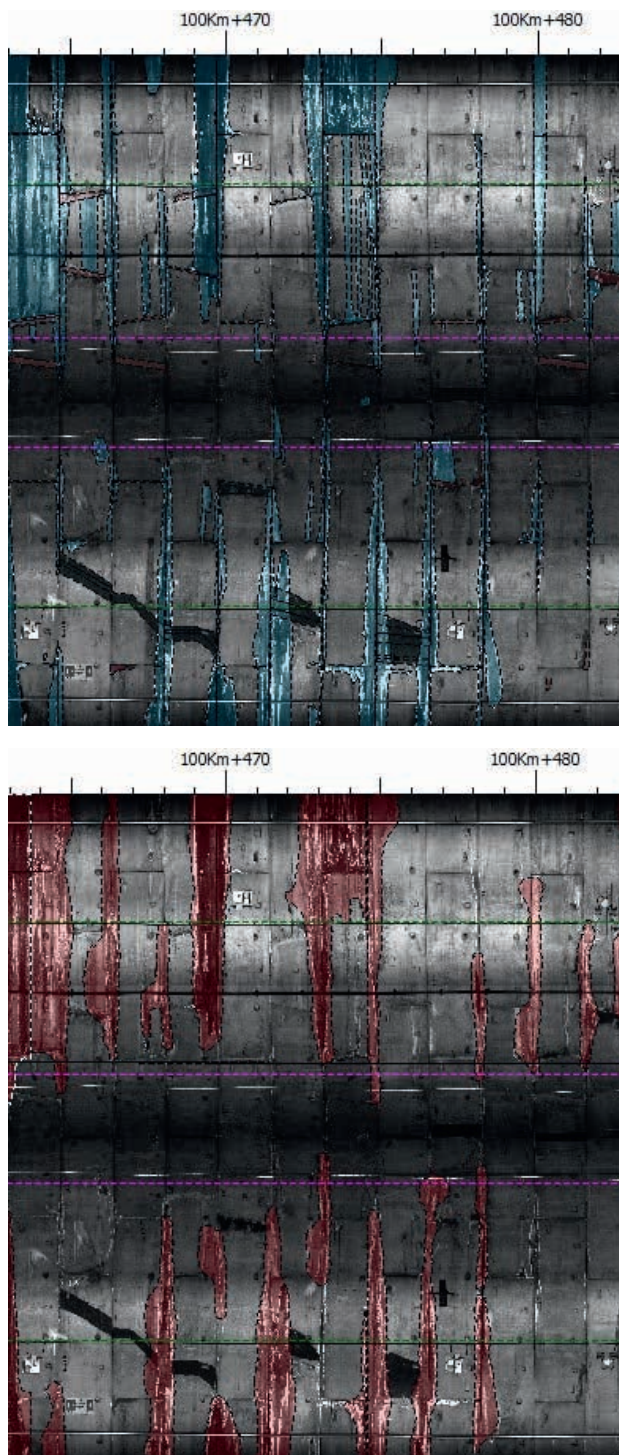


Figura 6 – Rilevamento manuale (in alto) vs. rilevamento con l'utilizzo dell'AI (in basso)

gNet ⁽⁵⁾, con una Rete Neurale Convolutionale (CNN) in grado di rilevare automaticamente e segmentare alcuni difetti a partire dall'analisi delle immagini.

L'implementazione è stata effettuata in Python e C++ utilizzando la libreria software Tensorflow di Google che, tra le librerie a disposizione, aveva tempi di elaborazione migliori. Il *training* dell'algoritmo è stato svolto su un dataset di 100-1.000 immagini.

La validazione e i test su immagini non utilizzate nella fase di *training* mostrano una leggera sovrastima dei difetti da parte dell'IA, del 10% in più (in media) rispetto al rilevamento manuale. Tale sovrastima è stata volutamente calibrata per ottenere valutazioni che, a vantaggio di sicurezza, non vadano a sottostimare le problematiche della galleria.

La figura 6 mostra il rilevamento manuale dei difetti dovuti alla presenza di acqua, mentre a destra il rilevamento per la stessa tipologia di difetto è stato condotto con l'utilizzo dell'Intelligenza Artificiale.

Digitalizzazione (DI)

Per Digitalizzazione (DI) si intendono tutti quei processi che, partendo dalla fase di SI, portano alla creazione di un modello digitale dell'opera in esame. Attraverso la combinazione di laser scanner e georadar di ARCHITA è possibile creare un modello 3D della galleria (figura 7) e associare le relative informazioni per impostare il gemello digitale in BIM, con le caratteristiche fisiche e funzionali dell'opera ⁽⁶⁾. In questo modo è possibile instaurare una stretta relazione tra la rappresentazione grafica del modello e le informazioni tecniche che il modello è in grado di immagazzinare e riportare con varie scale di definizione e informazione.

La ricostruzione geometrica è utilizzata come strumento di supporto alle milestones della metodologia MIRET, ma anche come strumento di verifica a sé stante (*i.e.* verifiche di transitabilità per le sagome limite in ambito ferroviario).

Pianificazione e Progettazione (PD)

Sulla base dei dati disponibili e/o delle milestones di DA-DI-WM, si passa sempre attraverso la fase cruciale di Pianificazione e Progettazione (PD). In questa fase, si aggiornano le strategie decisionali e progettuali ai fini della manutenzione o della gestione

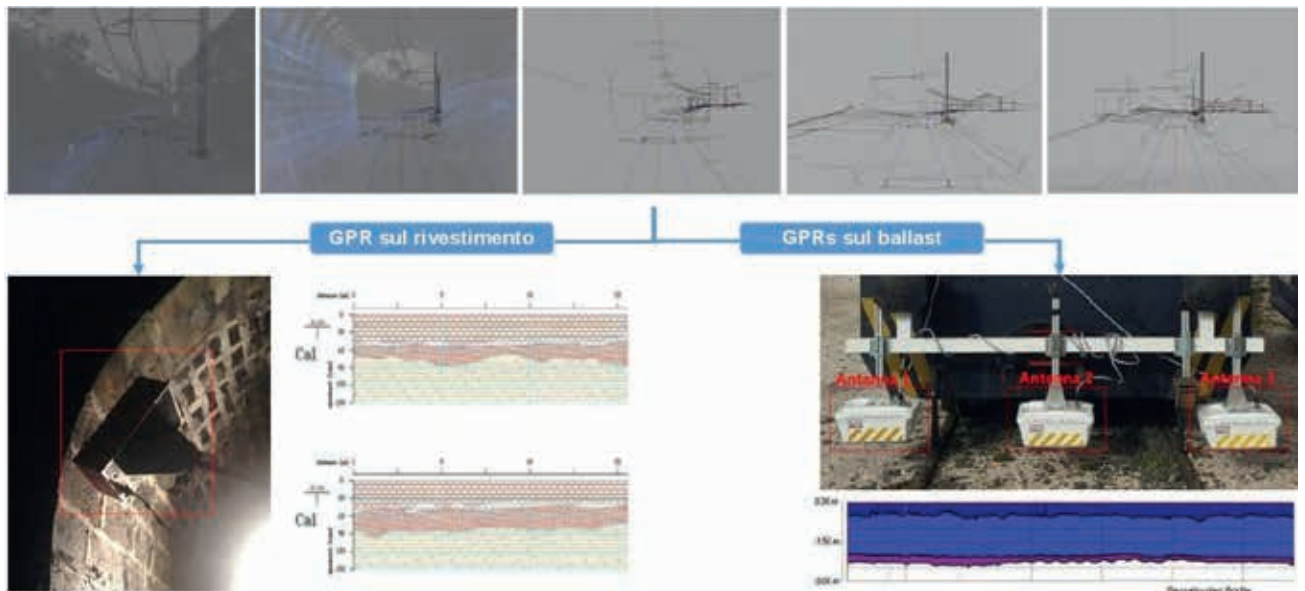
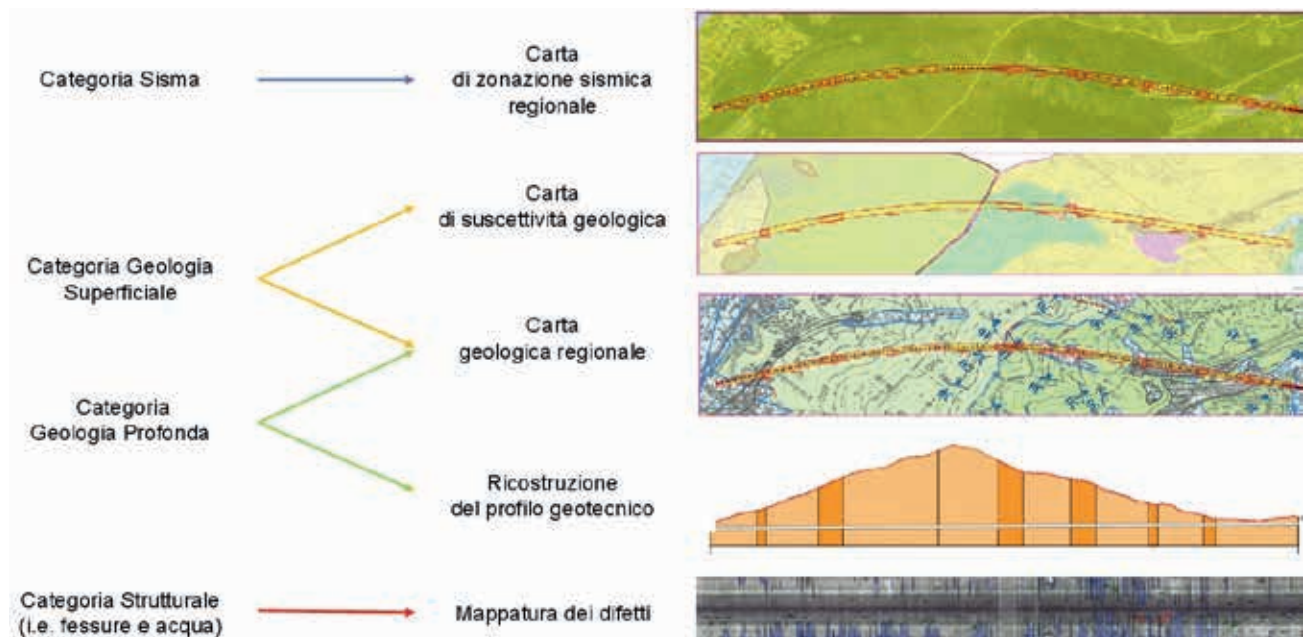


Figura 7 – Ricostruzione 3D da dati acquisiti



Settore 1		
Categoria	Indice di pericolosità vulnerabilità	Analisi SMCA
Sisma	20.00%	3.00%
Geologico Superficiale	15.00%	2.25%
Geologico Profondo	0.00%	0.00%
Fessure	0.93%	0.28%
Acqua	2.67%	1.07%
Indice del settore		6.60%



Figura 8 – Analisi di pericolosità-vulnerabilità di un settore della galleria

ad opera dei committenti in un ambiente informatizzato ⁽⁶⁾.

Anche in questo caso, ciascun gestore di linea si avvale di un proprio flusso che individua le priorità di intervento in funzione di considerazioni tecnico-economiche. Nel MIRET, dopo aver statisticamente elaborato i dati difettologici e considerando ulteriori parametri che forniscono informazioni descrittive ed analitiche sulle condizioni al contorno nelle quali l'opera è calata, si calcolano gli indici delle classi considerate ⁽⁷⁾. Successivamente gli indici vengono combinati tra loro attraverso un'Analisi Multicriteria Spaziale (SMCA) per delineare la pericolosità-vulnerabilità dell'opera (figura 8).

L'obiettivo finale è la gestione e l'identificazione del rischio per le gallerie esistenti (MIRET).

Lavori e Manutenzione (WM)

Qualsiasi ciclo di manutenzione o intervento sull'opera d'arte passa attraverso la fase di Lavori e Manutenzione, dove si attuano le specifiche scelte determinate dalla fase di PD. Dalla realizzazione di interventi strutturali alla semplice sigillatura di fessure, in questo blocco sono presenti tutte le soluzioni di intervento in galleria. L'intervento contribuisce al sistema galleria, riducendone il rischio e definendo un ulteriore istante di analisi della sua storia. Difatti, questo ci restituisce un nuovo punto di analisi da cui riprendere le fasi di SI, DA e far convergere la fase di PD euristicamente.

Monitoraggio (MO)

Collante di tutte le milestone è un efficace sistema di Monitoraggio (MO). Esso fornisce una risorsa con-

tinua di dati permettendo un input costante attraverso le diverse fasi. Il monitoraggio consente una valutazione in continuo, portando il sistema di analisi verso una struttura dinamica per la gestione degli asset da parte del committente e delle scelte da effettuare nella fase di PD. Questa *milestone* permette di aggiornare nel tempo i parametri presi in considerazione per il calcolo del rischio e di implementare modelli di analisi predittiva (fase PD) e manutenzione predittiva (fase PD-WM).

Conclusioni

Le pietre miliari del MIRET sono varie e complesse, così come le connessioni tra i suoi elementi. Si richiedono esperienza, tecnica, multidisciplinarietà, innovazione e, soprattutto, equilibrio. L'approccio sistemico-relazionale del MIRET attinge le soluzioni da tecnologie, strutture informatiche e processi all'avanguardia, legandoli ad un'unificazione dell'approccio dei committenti, i veri e necessari leader del cambiamento resiliente.

Il MIRET non è la risposta alla domanda di equilibrio, ma uno dei mezzi principali per veicolarla. La profonda conoscenza e l'uso consapevole delle risorse possono fare la differenza nell'impatto di un'opera o della sua manutenzione. Gallerie, ponti, opere di sostegno, dissesto idrogeologico e infrastrutture sono solo alcuni degli elementi dove l'ingegneria e il valore tecnico devono essere l'equilibratore tra il grigio e il verde, applicando soluzioni flessibili che mirano alla resilienza dell'opera e alla sua perfetta integrazione con l'ambiente circostante per la durata del ciclo di vita (e oltre).

Note

⁽¹⁾ <https://finance-commerce.com/2019/06/the-carbon-footprint-of-modern-construction-is-huge>.

⁽²⁾ <https://www.theguardian.com/environment/2011/apr/28/industries-sectors-carbon-emissions>.

⁽³⁾ FORIA F. *et al.*, 2019. ARCHITA: an innovative multidimensional mobile mapping system for tunnels and infrastructures. In Smart Underground Space 2019. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2019/44/mateconf_suslille2019_01005.pdf

⁽⁴⁾ FORIA F. *et al.*, 2021. *Artificial intelligence and image processing in the MIRET approach for the water detection and integrated geotechnical management of existing mechanized tunnels: methodology, algorithm and case study*. In Rocscience International Conference.

⁽⁵⁾ REN, Y. *et al.*, 2020. *Image-based concrete crack detection in tunnels using deep fully convolutional net-works*. Construction and Building Materials. Vol. 234.

⁽⁶⁾ FORIA, F. *et al.*, 2020. *Galleria Olmata, from survey to construction: an integrated design approach for the renewal of railway tunnels*. In World Tunnel Congress 2020.

⁽⁷⁾ FORIA, F. *et al.*, 2021. *Tunnel defects mapping and maintenance of existing tunnels with an innovative approach (MIRET): the case study of Genova-Ventimiglia railway line and Roma Metro lines*. In AFTES 2021.