

---

# Metodologia e Tecnologie per la Trasformazione Digitale e la Transizione Ecologica nella Progettazione e Pianificazione delle Infrastrutture

Foria Federico<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Facoltà classe in Rischio e sostenibilità nei sistemi complessi dell'Ingegneria Civile*  
*Indirizzo: Doctor of Philosophy (Dottorato di Ricerca)*

---

## **Parole Chiavi**

*Infrastrutture,  
sistema, territorio,  
priorità, rischio*

## **Relatori**

Prof. Natale Vito

## **Candidato/a**

Foria Federico  
Matricola: 76129091989  
UNITOSCANA/IT

## **Introduzione**

Il territorio e la sua antropizzazione vivono un dinamismo che è diventato cruciale nella necessità di trovare nuovi equilibri nei sistemi economici, sociali e ambientali. Gli eventi estremi sempre più frequenti (pericolosità), la globalizzazione (esposizione) e la fragilità delle comunità (vulnerabilità) hanno mutato notevolmente i rischi a cui sono soggetti questi sistemi e, di conseguenza, gli strumenti e i processi per poterli gestire. In questo scenario assumono un ruolo prioritario gli elementi che permettono, da un lato, la comunicazione e il collegamento degli individui, delle comunità e degli ambienti, ovvero le infrastrutture, e, dall'altro, le opere civili per la difesa e la salvaguardia del territorio.

La complessità sopraesposta richiede approcci sempre più connessi (IoT), digitalizzati (trasformazione digitale, e.g. GIS, BIM) e quantitativi, nel breve-medio termine, e integrati (olistici), intelligenti (IA, Smart data) e automatici (Edge), nel lungo termine. La gestione di tale complessità non può prescindere da uno sforzo di visione e di innovazione da inserire in un quadro strategico sistemico-relazionale.

La limitatezza, la distribuzione non bilanciata e la previsione di sfruttamento delle risorse naturali, tecnologiche e intellettuali, richiede un'attenzione prioritaria, e non più rimandabile, verso i valori di sostenibilità, nei pilastri sociali, economici e ambientali.

# Capitolo 1

## INFRASTRUTTURE E TERRITORIO: IL SISTEMA

### 1.1 Introduzione

Qualsiasi disastro naturale — che sia alluvione, terremoto, incendio, epidemia o effetti del cambiamento climatico — è anche un disastro umano. La natura è sempre più lo specchio del comportamento dell'uomo, del modo in cui si relaziona con i suoi simili, in cui guarda a se stesso e al futuro. Per questo è necessario innanzitutto ripensare il ruolo di chi con la natura ha un rapporto privilegiato, insieme al ruolo e agli strumenti che permettono la gestione delle relazioni tra gli stessi.

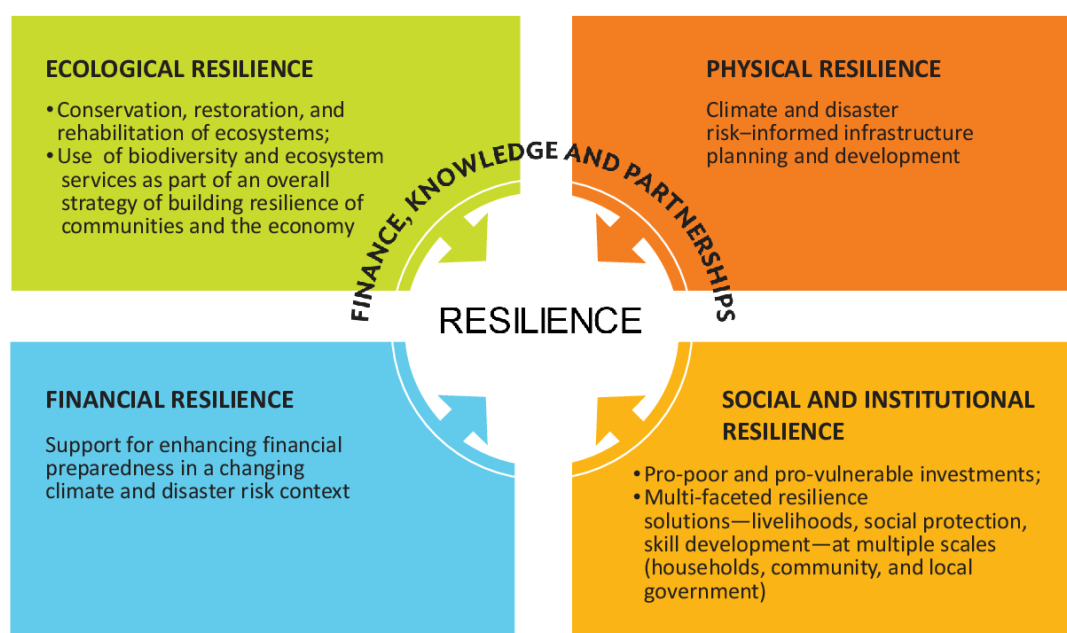
Sommersi da analisi allarmanti e appelli accorati sull'ambiente, i disastri naturali e gli impatti antropici, non li ascoltiamo; schiacciati sul presente, prediligiamo il qui e ora, non riusciamo a prendere impegni etici e tecnici che riguardino soggetti lontani nello spazio e nel tempo: numeri e dati non bastano per farci immedesimare davvero nel processo; abbiamo un problema di immaginazione.

La scienza deve fornire certezze e quantificazioni, non alibi. Quello che bisogna esigere più di tutto, però, è la capacità di immaginare, lo sguardo ampio e lungo sul futuro, la costruzione etica e di strumenti della responsabilità umana, individuale e collettiva, verso la Terra di tutti i suoi abitanti. La sostenibilità per le future generazioni delle specie viventi, degli elementi inerti e dell'intero sistema passa attraverso un grande sforzo di innovazione che deve permettere una gestione e valorizzazione delle risorse con politiche e decisioni che tendano alla rigenerazione del sistema Terra.

In questo scenario ricoprono un ruolo fondamentale le infrastrutture e la loro manutenzione, come elementi di collegamento delle comunità, degli ambienti, delle economie e delle specie viventi. In particolare, questo lavoro si focalizza sull'analisi di alcune innovazioni, piuttosto che focalizzarsi sullo stato dell'arte, ovvero la gestione digitale e integrata delle infrastrutture esistenti per poter determinare le priorità di

decisioni con strumenti di analisi dinamici che tengano in conto diversi scenari e la possibilità di inserire livelli di complessità ulteriori (e.g. cambiamento climatico) in un unico ambiente di collaborazione e lavoro. La gestione digitale e integrata serve allo scopo di efficientare le risorse, ridurre gli impatti antropici, aumentare la collaborazione e la sicurezza degli utenti, fornire elementi di sintesi chiari e oggettivi con l'obiettivo di permettere alla persona giusta di affrontare e risolvere il problema giusto. In particolare, questo lavoro si concentra sulle infrastrutture di trasporto con occasionali richiami ad altre tipologie in aspetti di inquadramento.

L'approccio alla resilienza e alla sostenibilità dell'infrastruttura, della manutenzione e dei relativi sistemi di gestione deve fondarsi su un approccio di tipo olistico, come mostrato in Figura 1-1. Le componenti essenziali del sistema (ecologica, finanziaria, sociale e istituzionale, e fisica) si interfacciano in un complesso flusso sistemico-relazionale che richiede un'analisi degli elementi e delle loro complesse relazioni. Questo lavoro si concentra sull'analisi quantitativa della componente fisica dell'infrastruttura e del territorio, fornendo gli elementi per permettere ad altre figure specialistiche di effettuare la valutazione qualitativa sulle relazioni con le altre componenti. Inoltre si concentrerà, tra le diverse tipologie presenti, sulle infrastrutture di trasporto e, in particolare, di quelle ferroviarie per la natura intrinseca maggiormente sostenibile.



**Figura 1-1: Approccio olistico alla Resilienza (Asian Development Bank, 2021)**

## 1.2 Le infrastrutture di trasporto

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” diventano, da elemento di disparità, soluzioni strategiche cruciali per l’unione.

L’infrastruttura è l’insieme delle parti necessarie ad articolare un ambiente per adeguarlo a particolari esigenze. Nei trasporti terrestri riguardano l’insieme di strade, ferrovie e canali, e cioè il complesso di opere che consentono i movimenti di passeggeri e trasferimenti di merci. Le infrastrutture di trasporto sono costituite dall’insieme dei sistemi e delle opere civili idonei e necessari all’esercizio di un modo di trasporto che si svolge su un determinato territorio, e possono essere distinte in: infrastrutture stradali, che includono i sistemi autostradali, le strade di grande comunicazione, la viabilità regionale e comunale; infrastrutture ferroviarie, composte dalle reti nazionali, dalle ferrovie locali e dalle reti metropolitane; infrastrutture aeroportuali per il trasporto aereo, portuali per il trasporto marittimo, idroviarie per il trasporto fluviale. Le i. stradali e ferroviarie, denotate in seguito infrastrutture viarie, costituiscono le opere di maggior rilievo, sia per gli aspetti realizzativi e gestionali, sia per la loro incidenza sullo sviluppo economico e sociale. Questo lavoro si concentrerà principalmente sulle infrastrutture stradali e ferroviarie, con particolare attenzione per queste ultime nel caso studio, data la loro rilevanza per la sostenibilità dei trasporti.

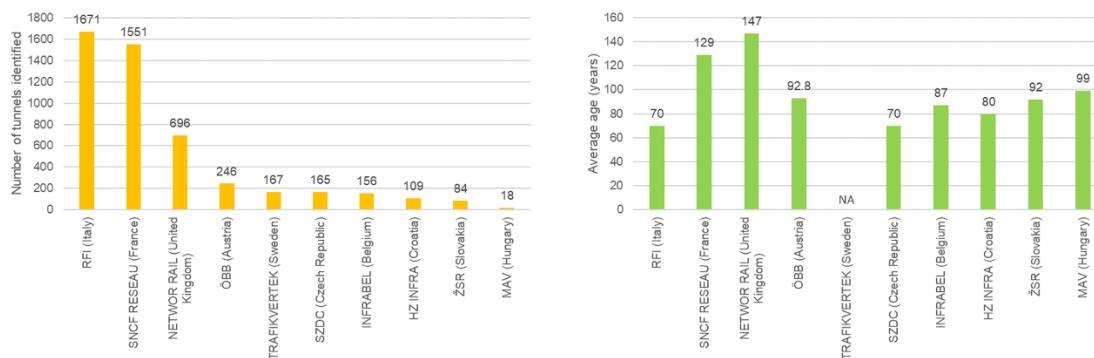
ANSFISA - Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture stradali e autostradali, aperta dal Ministro delle infrastrutture e della mobilità sostenibili ha constatato che le si conoscono in modo esaustivo le condizioni di meno del 10% di queste opere.

Date le sue caratteristiche storiche, geologiche e geomorfologiche uniche, le infrastrutture di trasporto in Italia constano di un sistema di rete molto complesso. In particolare:

- 840.000 km di strade, di cui 8.006 km di autostrade e 27.259 km strade statali (Anas) con 2.179 gallerie, 21.072 ponti e viadotti, 6.320 cavalcavia;
- 17.530 km di ferrovie nazionali e regionali con 5.443 passaggi a livello, 18.847 ponti, viadotti e gallerie, 3.236 stazioni, 30.818 scambi o intersezioni (ANSFISA, 2021);

- 1.130 km di ferrovie isolate con 944 passaggi a livello, 1529 ponti, viadotti e gallerie, 288 stazioni e 225 km di impianti di trasporto rapido di massa (metropolitane), di cui 131,6 km in galleria (ANSFISA, 2021).

La stessa situazione si può estendere, con le dovute eccezioni, al patrimonio infrastrutturale dei paesi industrializzati. A titolo di esempio, si mostra nell'immagine sottostante uno studio sull'età e le caratteristiche delle gallerie delle infrastrutture ferroviarie delle principali reti Europee. Non solo si nota la rilevanza dei dati italiani nel contesto Europeo, ma soprattutto della loro età. Infatti l'età media di 70 anni presenza anche l'influenza delle linee alta velocità che si sono diffuse negli ultimi 20 anni, condizionando il dato al ribasso.



**Figura 1-2: Numero di asset ed età media delle gallerie delle principali reti ferroviarie Europee (AFTES, 2021)**

### 1.2.1 Manutenzione e gestione

In questo scenario con il patrimonio infrastrutturale presentato, la chiave di volta risiede nei meccanismi di gestione dei sistemi e la manutenzione degli asset. 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.

Il rapporto del Gruppo Banca Mondiale “Well Maintained: Economic Benefits from more Reliable and Resilient Infrastructure”, documenta in modo efficace come una manutenzione tempestiva e di qualità sia in grado di accrescere la prosperità, favorendo crescita e benessere delle persone, delle imprese e dei sistemi economici nel loro complesso. Stimando i costi diretti imposti alle imprese, in paesi a medio-basso reddito, le perdite di fatturato dovute all'interruzione di corrente ammontano a 82

miliardi di dollari l'anno; il malfunzionamento delle infrastrutture di approvvigionamento idrico gravano per circa 6 miliardi di dollari l'anno; mentre i costi per interruzione o inagibilità dei trasporti dovuti ammontano a circa 107 miliardi di dollari l'anno. Tali stime escludono i costi indiretti, come la perdita di competitività e la ridotta capacità di attrarre investimenti. Sebbene distinguere e misurare l'impatto di molteplici cause di malfunzionamento (disastri naturali, obsolescenza, cattiva gestione, ecc.) rimane una sfida, emergono evidenze che investire in una maggiore resilienza delle infrastrutture sia efficace in termini di costi/benefici. Una delle analisi riportate stima che per ogni dollaro speso per rendere le infrastrutture esposte più resilienti, vi è un ritorno maggiore di 1 dollaro (con benefici crescenti se lo scenario include i danni del cambio climatico).

Il report OECD "Building Resilience - New Strategies for Strengthening Infrastructure Resilience and Maintenance", illustra invece come i sistemi di infrastrutture siano sempre più esposti ad una molteplicità di sfide vecchie e nuove. Gli eventi meteorologici estremi che si verificano con maggiore frequenza sono una preoccupazione crescente (nubifragi, inondazioni, terremoti e altre calamità naturali sono responsabili per una quota dal 10 al 70 percento di tutte le interruzioni, a seconda del paese e del settore), ma vanno affrontate anche la negligenza nella manutenzione passata, la mancanza di preparazione al rischio, o l'inadeguatezza di strutture desuete sottoposte allo stress di volumi di utilizzo molto accresciuti. Inoltre, differenti modelli di domanda e catene di approvvigionamento a crescente complessità stanno rendendo i sistemi infrastrutturali sempre più interdipendenti (e.g. la digitalizzazione e la decarbonizzazione stanno aumentando la dipendenza dall'economia delle reti di telecomunicazione e di elettricità).

### 1.2.2 *Verso infrastrutture sostenibili*

L'impero delle costruzioni (World Bank Group, 2019), 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 CO<sub>2</sub> prodotta dall'industria dei cementi (5.0%) impatta, ad esempio, quasi quanto l'agricoltura (5.2%) e poco meno dell'intera produzione di Oil and Gas (6.4%).

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 ambienti resilienti.

### **1.3 Inquadramento normativo della sostenibilità**

Nel seguito si focalizzano alcuni punti chiave nel quadro di normative Europee, degli standard regolamentati e delle linee guida in materia di ESG (Environment, Social and Governance) applicabili alle infrastrutture. Infatti, qualsiasi strumento successivamente menzionato e sviluppato nell'ambito di questo lavoro, deve essere inserito concettualmente in un contesto di sostenibilità, continuamente in evoluzione, ma con aspetti normativi consolidati.

#### *1.3.1 Quadro internazionale ed europeo*

La cornice di riferimento che orienta lo sforzo planetario per migliorare le condizioni di sostenibilità dello sviluppo economico è costituita dall'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile ossia di un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità sottoscritto nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell'ONU. Essa ingloba 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile - Sustainable Development Goals – in un grande programma d'azione per un totale di 169 'target' o traguardi. L'avvio ufficiale degli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile ha coinciso con l'inizio del 2016, guidando il mondo sulla strada da percorrere nell'arco dei prossimi 15 anni: i Paesi, infatti, si sono impegnati a raggiungerli entro il 2030.

Gli Obiettivi per lo Sviluppo danno seguito ai risultati degli Obiettivi di Sviluppo del Millennio (Millennium Development Goals) che li hanno preceduti, e rappresentano obiettivi comuni su un insieme di questioni importanti per lo sviluppo: la lotta alla povertà, l'eliminazione della fame e il contrasto al cambiamento climatico, per citarne solo alcuni. 'Obiettivi comuni' significa che essi riguardano tutti i Paesi e tutti gli individui: nessuno ne è escluso, né deve essere lasciato indietro lungo il cammino necessario per portare il mondo sulla strada della sostenibilità. Al settore "Industria, Innovazione e Infrastrutture" è direttamente indirizzato l'obiettivo 9

“Costruire un’infrastruttura resiliente e promuovere l’innovazione ed una industrializzazione equa, responsabile e sostenibile”.

In aggiunta agli obiettivi generali delle Nazioni Unite non bisogna dimenticare quelli più specifici di agenzie riconducibili all’ONU, come per esempio l’ILO (International Labour Organization) che ha intensificato la pubblicazione di raccomandazioni e linee guida sul tema della sicurezza dei luoghi di lavoro.

Nella cornice dell’ONU anche l’OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) ha iniziato a svolgere, nell’ultimo decennio, un’intensa attività di stimolo verso i governi, le Associazioni e le imprese per adottare politiche e strumenti sempre più efficaci nel sostegno a un modello di sviluppo economico sempre più responsabile e sostenibile.

La “OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct” (2018) costituisce il documento di riferimento generale per fornire alle imprese un modello da implementare per ridurre i rischi che possono causare impatti avversi sulle organizzazioni e i loro Stakeholders. La Guida si propone infatti di aiutare le imprese a comprendere e applicare il dovere di diligenza (due diligence) per la Responsible Business Conduct.

La linea guida OCSE fissa i principi fondamentali di una Due Diligence per la condotta responsabile di business:

- *carattere preventivo* (l’obiettivo è di evitare di causare impatti avversi su persone, ambiente e società e di cercare di prevenire impatti avversi direttamente correlati alle operazioni, prodotti o servizi attraverso relazioni economiche con terzi (fornitori e clienti);
- *scopo esteso a processi e obiettivi* (la due diligence è parte dei processi decisionali dell’azienda e del sistema di risk management e consiste in un insieme di processi interconnessi per identificare gli impatti negativi, prevenirli e mitigarli, monitorare l’attuazione e i risultati e comunicare in che modo gli impatti negativi vengono affrontati all’interno dell’impresa e lungo le filiere di fornitura e commerciali;
- *focus sulla doppia materialità* ossia alla probabilità di impatti negativi sulle persone, sull’ambiente e sulla società, che le imprese causano, a cui contribuiscono o a cui sono direttamente collegate (oltre ai rischi provenienti dal contesto esterno

che possono impattare sull'azienda; • *orientamento alla valutazione predittiva dei rischi* di eventi attuali o potenziali che possono causare impatti avversi futuri;

- *dinamicità*: l'attuazione del dovere di diligenza è continuativo, reattivo e mutevole e comprende cicli di feedback che permettono all'impresa di trarre insegnamenti da ciò che ha funzionato e da ciò che non ha funzionato in una logica di miglioramento continuo;

- *non consente il trasferimento di responsabilità*;

- *riferimento a linee guida e standard internazionali* di Responsible Business Conduct;

- *informata e guidata dal coinvolgimento degli stakeholder*;

- *comunicazione continua* (come parte integrante del processo di Due Diligence)

L'Europa è il blocco politico-economico nel mondo che per primo, e in modo sempre più convinto, ha avviato un processo di implementazione di politiche e normative sempre più stringenti con l'obiettivo di alzare la soglia delle obbligazioni per le imprese rispetto ai temi della responsabilità per lo sviluppo sostenibile. Uno dei cardini del Green Deal Europeo, il programma di investimento comunitario a sostegno delle politiche economiche degli Stati membri per la resilienza e il rilancio prevede in pochi anni la mobilitazione di oltre 1000 miliardi di euro che si aggiungono a quelli previsti in altri piani già approvati in passato per azioni che si propongono di coniugare la crescita economica con lo sviluppo sostenibile.

Sulla scia delle linee guida OCSE, l'Unione Europea ha avviato una strategia finalizzata a introdurre obblighi e impegni crescenti sulle imprese al fine di tutelare sempre meglio i legittimi interessi dei suoi Stakeholders.

Per le finalità di questo documento ci limitiamo soltanto a fornire un quadro sintetico dei Regolamenti e Direttive comunitarie già in vigore, escludendo quelle di recente o imminente entrata in vigore (da metà 2022).

### 1.3.2 *Direttiva 2014/95/EU*

La Direttiva 2014/95/EU nota come “Non Financial Reporting Directive – NFRD” (recepita in Italia con il D.Lgs. 254/2016) è stato il primo atto significativo adottato dall'Unione Europea a tutela di investitori e risparmiatori. La Direttiva 2014/95 ha introdotto per la prima volta l'obbligo di una valutazione e comunicazione da allegare

al bilancio basata sulla valutazione dei rischi di impatti avversi futuri sulle imprese e i suoi stakeholder relativi ad aspetti non finanziari (Governance, Sociale, Ambientale, Business Ethics).

La direttiva richiede alle imprese che rientrano nel suo campo di applicazione (dimensione con almeno 500 dipendenti) di predisporre un rendiconto da allegare al bilancio di esercizio nel quale è presente una dichiarazione relativa alla valutazione dei “... d) i principali rischi connessi a tali aspetti legati alle attività del gruppo anche in riferimento, ove opportuno e proporzionato, ai suoi rapporti, prodotti e servizi commerciali che possono avere ripercussioni negative in tali ambiti, nonché le relative modalità di gestione adottate dal gruppo.

La Direttiva è importante perché estende il perimetro dell’informazione di sostenibilità dal (relativamente) ristretto confine della legal entity dichiarante all’intera filiera di fornitura.

Attualmente è in fase avanzata di elaborazione la proposta di Direttiva CSRD che emenda alcuni precedenti atti normativi europei (Direttiva contabile, Direttiva e Regolamento sull’audit, la «Transparency Directive»).

La nuova Direttiva rinomina il termine “reporting non finanziario” (scomparirà quindi presumibilmente l’espressione «informazione non finanziaria») e lo trasforma in “reporting di sostenibilità”. Non si tratta ovviamente di un semplice cambio di denominazione ma di un ben più profondo intervento nel segno della consistenza, credibilità e trasparenza del Corporate Sustainability Reporting.

In primo luogo la proposta di Direttiva estende il campo di applicazione del reporting di sostenibilità (rispetto alla Direttiva 94/2015) a tutte le grandi imprese, le banche e le assicurazioni europee quotate o non quotate, nonché a tutte le società quotate, con la sola eccezione delle micro-quotate. La soglia dimensionale delle imprese rientranti nel campo di applicazione della Direttiva scende da 500 a 250 addetti medi annui superiore a 250 e la platea delle imprese europee direttamente interessate passerà dalle circa 11.000 odierne a oltre 49.000. I gruppi, inoltre, dovranno produrre un report di sostenibilità consolidato (una sub-holding sarà esentata dal Report di sostenibilità consolidato, se la sua controllante produce tale documento secondo le regole e gli standard europei).

Alle imprese che rientrano direttamente nel campo di applicazione della proposta di Direttiva occorre aggiungere quelle imprese che saranno indirettamente interessate ossia le imprese che si trovano lungo la filiera di fornitura delle aziende direttamente interessate alle quali sarà richiesto di fornire a queste delle informazioni altrettanto credibili e affidabili.

In un settore come quello delle infrastrutture questo significa che il Corporate Sustainability Reporting non si limita per esempio al perimetro delle società di progettazione e/o ai main contractors ma si estende anche alla filiera sempre più complessa e frazionata di fornitori di materiali, sub-contractors e loro sub-contractors.

Le nuove regole sul reporting di sostenibilità, infine, si applicheranno in modo volontario alle PMI non quotate. Verranno emanati degli standard europei di reporting differenziati e semplificati per le PMI quotate, i quali saranno comunque applicabili dopo tre anni rispetto alle altre imprese. L'informativa di sostenibilità dovrà essere inserita nella Relazione sulla Gestione, e non in un fascicolo a parte, divenendo così parte integrante e sostanziale del reporting aziendale (cosiddetto "One Report").

L'informazione di sostenibilità avrà natura sia quantitativa che qualitativa e dovrà contenere sia informazioni di carattere retrospettivo che di tipo prospettico (forward-looking), focalizzata sulla valutazione del livello di esposizione a impatti avversi futuri.

L'aspetto di fondamentale importanza introdotto nel testo della proposta di direttiva riguarda l'introduzione dell'obbligo di certificazione di terza parte indipendente del Corporate Sustainability Reporting che potrà essere effettuato soltanto da revisori contabili e società di revisione (dal momento dell'approvazione della Direttiva).

### 1.3.3 *Regolamento 2019/2088*

All'evoluzione della Direttiva 2014/95 in materia di comunicazione societaria sulla sostenibilità si accompagnano altri Regolamenti entrati in vigore nel 2021 a tutela degli investitori: il Regolamento 2019/2088 "Sustainable Finance Disclosure Regulation" (SFDR) entrato in vigore a marzo 2021 e il Regolamento 2020/852 "Relativo all'istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del regolamento (UE) 2019/2088" (conosciuto come Regolamento della Tassonomia).

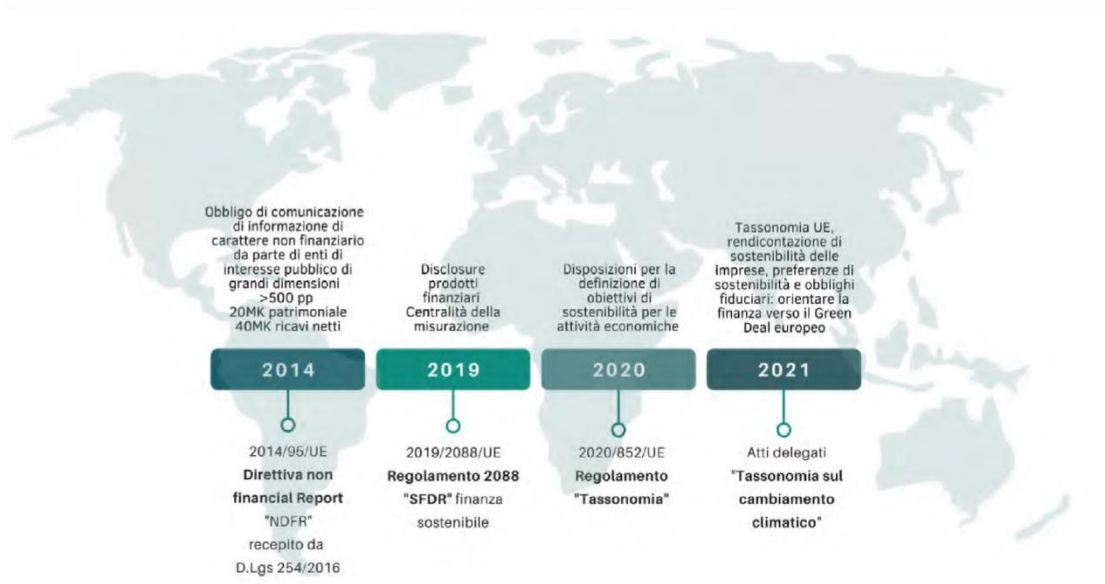
Il Regolamento 2019/2088 si applica a tutti i partecipanti dei mercati finanziari; insieme agli RTS ad esso collegati stabilisce norme armonizzate sulla trasparenza per i partecipanti ai mercati finanziari e i consulenti finanziari per quanto riguarda l'integrazione dei rischi di sostenibilità e la considerazione degli effetti negativi per la sostenibilità nei loro processi e nella comunicazione delle informazioni connesse alla sostenibilità relative ai prodotti finanziari. Il regolamento 2019/2088 introduce l'obbligo di descrivere le seguenti informazioni nell'informativa precontrattuale dei prodotti finanziari:

- a) in che modo i rischi di sostenibilità sono integrati nelle politiche di investimento;
- b) i risultati della valutazione dei probabili impatti dei rischi di sostenibilità sul rendimento dei prodotti finanziari offerti alla clientela.

In aggiunta ai Regolamenti e Direttive comunitarie già emanati, rileva in prospettiva anche la proposta di Direttiva “Corporate Due Diligence and Corporate accountability” che introduce l'obbligo di Due Diligence in materia di sostenibilità. Questa direttiva mira a garantire che le imprese che operano nel mercato interno adempiano al loro dovere di rispettare i diritti umani, l'ambiente e la buona governance evitando di causare o contribuire all'emersione di rischi ESG, anche in riferimento alle loro relazioni d'affari. A tal fine, essa stabilisce obblighi minimi (minimum requirement) applicabili alle imprese in virtù dei quali queste ultime sono tenute a individuare, prevenire, controllare, riferire internamente, affrontare e correggere, divulgare (terzo pilastro) i rischi che le loro attività possono comportare in tema di rispetto dei diritti umani, di tutela dell'ambiente e di buona governance. La direttiva mira a garantire che le imprese siano responsabili per gli eventuali effetti negativi che esse dovessero provocare in forza delle loro attività in ordine ad aspetti ESG, lungo tutta la loro catena di valore. L'aspetto più rilevante di questa proposta di Direttiva è l'ambito di applicazione che comprende:

- tutte le imprese soggette al diritto di uno Stato membro o stabilite nel territorio dell'Unione;
- le imprese a responsabilità limitata disciplinate dal diritto di uno Stato non membro e non stabilite nel territorio dell'Unione quando operano nel mercato interno vendendo beni o prestando servizi. Gli effetti combinati

delle direttive sulla rendicontazione dei rischi non finanziari e di quelle sull'introduzione dell'obbligo di due-diligence di tali rischi, possano incentivare la diffusione di metodologie di rilevazione dei rischi ESG sempre più orientate alla stima quantitativa dei rischi e a un maggiore livello di credibilità, grazie anche alla certificazione di terza parte indipendente.



**Figura 1-3: Evoluzione normativa europea (2014-2021).**

#### 1.3.4 Regolamento 2020/852 “Tassonomia”

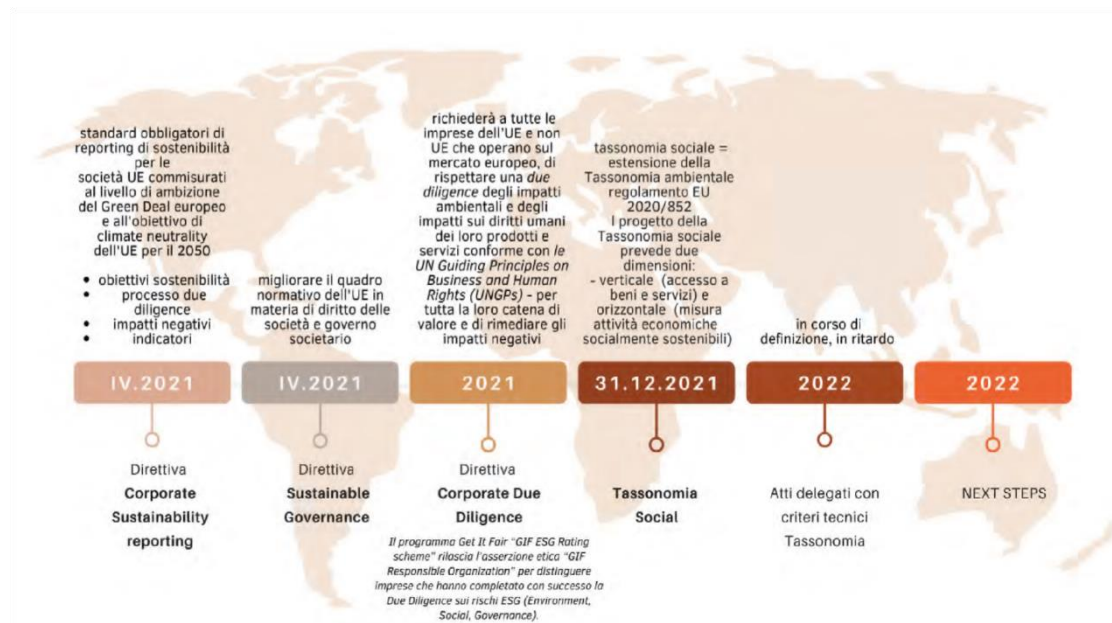
È in questo scenario e percorso che si colloca il varo del Regolamento europeo 2020/852 approvato dal Parlamento e dal Consiglio il 18 giugno 2020 con il quale si definiscono le regole per garantire investimenti sostenibili. Il regolamento stabilisce i criteri per determinare se un'attività economica possa considerarsi ecosostenibile, al fine di individuare il grado di ecosostenibilità di un investimento; e si applica sia all'Unione che ai singoli Stati membri che stabiliscono obblighi per i partecipanti ai mercati finanziari, a questi ultimi e alle imprese soggette all'obbligo di pubblicare una dichiarazione di carattere non finanziario.

Il regolamento contribuisce a definire un'attività economica ecosostenibile in quanto contribuisce in modo sostanziale al raggiungimento di uno o più dei seguenti obiettivi ambientali (elencati all'articolo 9):

- a. la mitigazione dei cambiamenti climatici;
- b. l'adattamento ai cambiamenti climatici;
- c. l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine;

- d. la transizione verso un'economia circolare;
- e. la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento;
- f. la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi.

A ciascun obiettivo è dedicato un articolo di dettaglio nel quale vengono individuati i principali contributi per il loro raggiungimento e i relativi criteri di vaglio tecnico (articoli da 10 a 16). Vengono altresì definite le garanzie minime di salvaguardia a cui ci si deve attenere (articolo 18). Ed è nel regolamento 2020/852 che viene richiamato il principio che un'attività economica può considerarsi ecosostenibile se non arreca un danno significativo a nessuno degli obiettivi ambientali sopra richiamati, dedicando a questo argomento l'articolo 17, nel quale vengono indicati per ciascun obiettivo comportamenti e pratiche in contrasto con il principio del DNSH (“do no significant harm” = “non arrecare un danno significativo”).



**Figura 1-4: Evoluzione normativa europea in materia sostenibilità (2021-2022)**

Ad esempio, la produzione di acciaio è considerata dal Regolamento della tassonomia un'attività economica di transizione, per quanto riguarda l'obiettivo di mitigazione al cambiamento climatico, purché soddisfi i criteri di vaglio tecnico che verranno aggiornati con cadenza regolare negli anni futuri, per adeguarsi anche all'evoluzione delle tecnologie presenti sul mercato e agli obiettivi EU di decarbonizzazione al 2050. Oggi, questi criteri prevedono che il settore siderurgico per essere allineato alla tassonomia da un lato produca con una quantità ridotta di emissioni di CO<sub>2</sub>e per tonnellata di prodotto finito e dall'altra, in riferimento alla

produzione con forno elettrico, mantenga il rapporto tra i rottami di acciaio in ingresso e il prodotto in uscita non è inferiore al 70% per la produzione di acciaio alto legato e al 90% per la produzione di acciaio al carbonio. In altre parole, il settore siderurgico viene considerato sostenibile a fronte di una produzione a emissioni ridotte e che utilizza come materia prima una materia di recupero (il rottame). In aggiunta all'obiettivo di mitigazione al cambiamento climatico, la Tassonomia richiede di non arrecare un danno significativo agli altri 5 obiettivi di sostenibilità. Oltre alle richieste normative, a sollecitare nello specifico il settore, è il mercato dell'edilizia, così come il mercato finanziario: sempre più frequenti sono le richieste di compliance a determinati parametri ambientali e sociali a cui la Tassonomia fa riferimento. È quindi fondamentale adeguarsi a queste richieste in continua evoluzione, sia sul lato della mera compliance quindi in termini di rendicontazione ma anche a un livello precedente, che è quello di valutazione, raccolta e catalogazione delle informazioni affinché esse siano in linea con la Tassonomia ambientale.

Negli ultimi stanno fiorendo certificazioni specifiche in ambito di sostenibilità e prime linee guida per l'applicazione del DNSH all'ambito delle infrastrutture (ICMQ, 2021). Tali principi, in genere comuni a prescindere dal framework, sono fondamentali per qualsiasi attività.

#### 1.3.5 Linee Guida EBA

Nel 2020 l'EBA (*European Banking Authority*)<sup>1</sup> ha pubblicato un documento di fondamentale importanza per il sistema del credito Europeo: le *Guidelines on Loan Origination and Monitoring*<sup>2</sup>. Il 30 Giugno 2022 è la data ultima fissata dall'EBA (European Banking Authority) in cui le banche dovranno ricevere l'autorizzazione, da parte delle Banche Centrali del paese (da noi Banca d'Italia) sulle modalità di integrazione delle valutazioni dei rischi ESG nei modelli di definizione del merito creditizio e quindi, in ultima analisi, nella determinazione del tasso d'interesse nei prestiti a medio – lungo termine.

La valutazione del merito di credito è l'elemento principale dell'approccio globale della European Banking Authority (EBA) all'erogazione dei prestiti, che riunisce i requisiti prudenziali, di governance e di protezione dei consumatori *negli orientamenti dell'EBA sull'erogazione e il monitoraggio dei prestiti*.

L'obiettivo degli orientamenti è migliorare le pratiche di concessione del credito e i dispositivi di governance delle banche al fine di garantire che dispongano di standard di prestito solidi e prudenti. Ciò a sua volta dovrebbe garantire che i prestiti di nuova origine siano di elevata qualità creditizia e contribuiscano in futuro a livelli più bassi di crediti deteriorati. Gli orientamenti mirano inoltre a garantire che le pratiche di concessione del credito siano allineate alle norme di tutela dei consumatori e rispettino un trattamento equo dei consumatori.

Al fine di conseguire tali obiettivi, gli orientamenti dell'EBA specificano i dispositivi di governance interna per il processo decisionale in materia di credito, la gestione del rischio di credito nel punto di origine del credito e il monitoraggio del rischio di credito, sulla base dei requisiti degli *orientamenti dell'EBA sulla governance interna*.

Le linee guida chiariscono l'uso di modelli automatizzati nel processo decisionale in materia di credito e nella valutazione del merito creditizio e stabiliscono requisiti specifici di governance del modello per tali modelli.

L'EBA fornisce anche orientamenti sulla valutazione delle garanzie reali al momento dell'erogazione del prestito, nonché per il monitoraggio e la rivalutazione. In questi requisiti, l'EBA chiarisce anche l'uso di modelli statistici avanzati.

Le linee guida EBA sul Loan Origination and Monitoring riflettono le recenti priorità di vigilanza e gli sviluppi politici relativi alla concessione di crediti, compresi i fattori ESG (Environmental, Social and Governance), la lotta al riciclaggio di denaro e al finanziamento del terrorismo e l'innovazione basata sulla tecnologia.

Per le imprese di ogni settore diventerà sempre più importante ottenere rating ESG affidabili e in grado di soddisfare le linee guida stabilite dall'EBA per ottenere nel tempo condizioni di accesso al credito sempre più vantaggiose.

### 1.3.6 Rating ESG: ISO e UNI

La norma volontaria internazionale ISO 26000 “*Guidance for Social Responsibility*” (2020) costituisce il punto di riferimento contenente l'elenco degli elementi da valutare ai fini di determinare la responsabilità sociale (Governance e sistema di gestione, sociali, ambientali e di etica di impresa) e indirizza le modalità e

gli approcci per integrare il comportamento responsabile nelle strategie, sistemi, pratiche e processi organizzativi esistenti.

Questa norma, raccordata con le linee guida OCSE, non è certificabile tuttavia fornisce alle imprese un riferimento fondamentale per implementare la Responsible Business Conduct e lo sviluppo sostenibile.

Poiché, negli ultimi anni, si è registrata una proliferazione incontrollata di marchi e certificazioni di prodotto, processo e organizzazione aventi per oggetto le caratteristiche etiche l'ISO ha ritenuto opportuno (nel 2019) definire due norme fondamentali, con l'intento di limitare il confuso mondo delle asserzioni etiche:

- *ISO/TS 17033 “Ethical claims – principles and supporting information”*
- *ISO/IEC 17029 “Conformity Assessment – General principles requirements for verification and validation bodies”*

La norma ISO/TS 17033 stabilisce i principi e i requisiti per sviluppare e dichiarare un'asserzione etica e per fornire le informazioni di supporto. La norma si applica a tutti i tipi di organizzazione ed è applicabile a tutti i tipi di asserzioni etiche relativa a prodotti, servizi, processi o organizzazioni. La norma costituisce un riferimento anche per programmi per specifiche asserzioni etiche. La norma ISO/TS 17033 definisce il termine “asserzione etica” come “un'affermazione, un simbolo o una grafica che dichiara una o più aspetti etici di un prodotto, processo, servizio o organizzazione” e specifica che “gli aspetti etici possono includere un ampio spettro di questioni sociali, giustizia economica e di sostenibilità ... Molti aspetti etici sono descritti in documenti internazionali e programmi identificati nella bibliografia”.

Un'asserzione etica può essere un rapporto, una dichiarazione, un piano di progetto o come dati consolidati. Un “rapporto di sostenibilità” rientra tra le possibili forme di “asserzione etica”. Un'asserzione etica può essere auto-dichiarata dall'organizzazione (come nel caso di un Sustainability Reporting conforme a standard), sottoposta al controllo di seconda parte (Es.: un auditor, un buyer, una banca) oppure al controllo di una terza parte indipendente in possesso di determinati requisiti.

Come si effettua la conferma di affidabilità delle informazioni dichiarate in un'asserzione etica definita dalla norma ISO 17033? Quali sono i requisiti dei “programmi” citati nella ISO 17033, e quali sono i requisiti degli organismi che possono svolgere tali controlli?

La norma ISO/IEC 17029 stabilendo i principi e requisiti generali per la competenza, il regolare e coerente funzionamento e l'imparzialità di organismi che eseguono attività di validazione/ verifica (di asserzioni etiche) fornisce una risposta a tutte queste domande.

La norma ISO/IEC 17029 definisce requisiti relativi al processo di conferma di un'asserzione etica, i requisiti che deve possedere un organismo di terza parte che esegue tali controlli e i requisiti di un programma di conferma.

La norma ISO/IEC 17029 è applicabile a qualsiasi settore, in combinazione a programmi specifici che contengono requisiti per i processi e le procedure di validazione/verifica. La norma contiene requisiti generali ed è neutra rispetto a programmi di validazione/verifica in corso. I requisiti dei programmi applicabili sono aggiuntivi rispetto ai requisiti della norma.

La norma può essere utilizzata come base per l'accreditamento di organismi in combinazione con i requisiti di un programma valutato idoneo per le finalità di accreditamento. In altre parole, non può essere effettuata una valutazione di asserzione etica (basata su uno score sui rischi ESG) se non all'interno di un Programma. La norma ISO 17029 definisce "Programma" un insieme di regole, procedure e gestione delle attività di validazione e, nell'Annex A, i requisiti che deve possedere tra cui:

- campo di applicazione;
- criteri di competenza per il gruppo e l'organismo di validazione;
- processo di validazione;
- attività di raccolta delle evidenze ai fini della validazione;
- reporting della validazione.

A questi criteri base se aggiungono altri da soddisfare e tra questi ve ne sono alcuni importanti dal punto di vista di chi deve utilizzare i risultati delle valutazioni:

1. il livello di assicurazione in una scala che per esempio comprende "limitato – ragionevole - assoluto". Un programma di validazione basato su un rating dei rischi ESG non potrà fornire, per definizione, un livello di assicurazione "assoluto" (significherebbe assicurare che un evento non accadrà mai in futuro) ma non avrà grande valore se offre un livello di assicurazione "limitato". Il livello "ragionevole" è adeguato a programmi di rating ESG che determinano lo score in base alla verifica di plausibilità delle assumptions;

2. il grado di materialità, ossia il livello di confidenza dello score, rispetto agli obiettivi, che tiene conto del grado di copertura dei criteri, della robustezza della metrica e dell'affidabilità del processo di valutazione.

Tutte le informazioni relative a un programma devono essere disponibili al pubblico in modo da assicurare la massima trasparenza. La valutazione di un programma per scopi di accreditamento rispetto alla norma ISO 17029 costituisce un elemento fondamentale per fornire alle parti interessate l'evidenza che tutti i suoi elementi siano conformi ai requisiti e che vi sia un continuo monitoraggio e verifica sui cambiamenti ad esso apportati nel tempo.

La norma richiama due termini, verifica e validazione, apparentemente sinonimi, ma in realtà intrinsecamente diversi. Nelle primissime righe dell'introduzione alla norma ISO/IEC 17029 si specifica che "la validazione e verifica, come attività di valutazione della conformità, sono intese essere una conferma dell'affidabilità di informazioni dichiarate in asserzioni (claim). Altri termini in uso per gli oggetti di valutazione mediante validazione e verifica sono "dichiarazione" (Statement, declaration), "asserzione" (claim, assertion), "predizione" (prediction) o rapporto (report). Entrambe le attività in esame si distinguono in funzione della sequenza temporale dell'asserzione sottoposta a valutazione". Per le finalità di questo documento, la distinzione tra i termini "verifica" e "validazione" assume un'importanza fondamentale per chiarire l'approccio alla valutazione di un rapporto di sostenibilità.

La verifica è definita come la "conferma di un'asserzione (etica) attraverso la fornitura di evidenza oggettiva che i requisiti specificati sono stati soddisfatti. La verifica è considerata essere un processo per valutare un'asserzione sulla base di dati storici e informazioni al fine di determinare se l'asserzione stessa è materialmente corretta e conforme ai requisiti specificati. La verifica si applica ad asserzioni riguardanti eventi che sono già accaduti o risultati che sono già stati raggiunti (conferma della veridicità)."

La validazione è definita invece come la "conferma di un'asserzione (etica), attraverso la fornitura di evidenza oggettiva che - per uno specifico utilizzo o applicazione futuro previsto - i requisiti sono soddisfatti. L'evidenza oggettiva può provenire da fonti reali o simulate. La validazione è considerata essere un processo per

valutare la ragionevolezza di assunzioni, limitazioni e metodi che supportano un'asserzione etica circa l'esito di attività future.

La validazione si applica ad asserzioni (etiche) riguardanti un utilizzo futuro previsto sulla base di informazioni prospettiche (conferma di plausibilità)".

In Italia l'UNI, primo ente normatore al mondo, ha pubblicato (in convenzione con Accredia – Ente di Accreditamento Nazionale) un documento tecnico denominato Prassi di Riferimento UNI/Pdr 102:2021 “Asserzioni etiche di responsabilità per lo sviluppo sostenibile” che chiarisce alcuni punti fondamentali per la corretta applicazione della ISO 17033 e ISO 17029 relativi a:

1. programmi di validazione di asserzioni etiche basati sulla valutazione dei rischi ESG;
2. accreditamento di organismi di validazione rispetto a programmi positivamente valutati per fini di accreditamento.

Dall'analisi degli scopi e delle definizioni incluse nelle norme ISO 17033 e ISO 17029 si può riassumere che:

- a. un Rapporto di sostenibilità è un tipo di asserzione etica e come tale soggetto ai requisiti della norma ISO 17033;
- b. un Rapporto di sostenibilità non può contenere solo dati e informazioni relativi a eventi che sono già accaduti o risultati che sono già stati raggiunti ma deve contenere informazioni sul livello di esposizione ai rischi di eventi che possono causare impatti avversi futuri sull'organizzazione e i suoi stakeholder dovuti a tutti gli aspetti della responsabilità sociale (in accordo con le linee guida OCSE sulla Responsible Business Conduct, i dettami della proposta di direttiva CSRD e le esigenze degli stakeholder). Un Rapporto di sostenibilità deve infatti contenere ragionevoli “assunzioni, limitazioni e metodi che supportano un'asserzione etica circa l'esito di attività future”;
- c. la valutazione di conformità di un rapporto di sostenibilità rientra nel campo di applicazione di una “validazione di asserzione etica” e non di una “verifica” (ora è chiaro perché l'assurance su un rapporto conforme allo standard GRI o a qualsiasi standard focalizzato sulla presentazione di dati relativi a fatti già accaduti o a risultati già raggiunti sia considerato una verifica);

d. la ISO/IEC 17029 è la norma per l’accreditamento di organismi di validazione di asserzione etica rispetto ai requisiti indicati nella norma ISO 17033 da parte di Enti di accreditamento riconosciuti;

e. la validazione di un’asserzione etica di terza parte indipendente può avvenire soltanto nell’ambito di un programma che soddisfi determinati requisiti e sia stato positivamente valutato per fini di accreditamento;

f. un organismo di validazione di asserzione etica può essere accreditato solo ed esclusivamente con riferimento alla ISO 17029 più i requisiti di un programma conforme alla stessa norma;

g. i requisiti del processo di validazione descritti dalla ISO 17029, se combinati con un programma adeguato allo scopo, consentono il rilascio di una validazione con un livello di assurance “ragionevole”. A questo punto è possibile confrontare la gamma di approcci che si possono utilizzare a supporto della valutazione dei fornitori e del Corporate Sustainability Reporting per divulgare informazioni sempre più credibili e robuste dei rischi ESG agli stakeholder.

***Tabella 1-1: Approcci alternativi per la valutazione dei rischi ESG.***

Elemento	Auto-dichiarazioni	Indagini basate su Questionari	Rating ESG di Agenzie	Validazione di rischi ESG
Riferimenti a linee guida e norme internazionali	Basso	Basso	Basso	Alto
Iniziativa multistakeholder	No	No	No	Si
Completezza di tutti gli aspetti ESG	Limitata	Media	Alta	Alta
Bilanciamento dei criteri di valutazione	Nessuno	Poco	Medio	Alto
Analisi di materialità nella valutazione	No	No	No	Si
Focus sui rischi futuri (looking forward)	Molto basso	Poco	Nessuno	Alto
Metrica orientata al risk scoring quantitativo	No	No	Si	Si
Processo valutazione conforme a standard	No	No	No	Si
Assessment presso l’azienda	No	No	No	Si
Programma conforme a norme internazionali	No	No	No	Si
Accreditamento di organismi di verifica	No	No	No	SI

Grado di verifica e assurance	Nessuno	Poco	Nessuno	Alto
Sorveglianza periodica	No	No	No	Si
Affidabilità	Molto bassa	Bassa	Media	Alta

Nel quadro di norme internazionali pubblicate nel 2019 (ISO 17033 e ISO 17029) esiste anche un riferimento attuativo italiano nella norma nazionale UNI/Pdr 102:2021 “Asserzioni etiche di responsabilità per lo sviluppo sostenibile” che favorisce l’applicazione degli Enti di Accredimento di regolamenti tecnici per l’approvazione di programmi di validazione di asserzioni etiche e per organismi di validazione in conformità alla norma ISO 17029.

#### 1.4 Sostenibilità e resilienza delle infrastrutture

La sostenibilità e la resilienza dell’infrastruttura e del territorio si inseriscono nel quadro normativo precedentemente esposto, ma devono essere inclusi anche in una visione etica del ruolo dell’ingegneria e delle scienze più ampio. L’insieme di questi elementi costituisce l’inquadramento di analisi in cui inserire l’impiego e la ricerca di nuove tecnologie e processi. Questo lavoro si concentra sulle infrastrutture di trasporto e in particolare quelle ferroviarie, per la natura intrinseca maggiormente sostenibile.

Si ritiene utile partire dall’introduzione ad una disciplina che unisce diversi di questi concetti nel campo delle scienze della terra, ovvero la Geotetica. I riferimenti sotto riportati sono tratti principalmente dal libro manifesto (Peppoloni, 2021).

##### 1.4.1 *Geoetica*

Il fatto che le azioni umane lascino profonde tracce sul pianeta è un dato inconfutabile (Rockstrém e altri 2009; Ripple e altri 2019; Frederikse e altri 2020; Jouffray e altri 2020). L’impatto antropico sui sistemi socio-ecologici è profondo e induce modifiche spesso irreversibili a questi complessi insiemi di interrelazioni adattative, in cui gli elementi naturali e antropici sono strettamente connessi (Berkes - Folke 1998; Ostrom 2009) e le cui dinamiche restano difficili da valutare e prevedere per le numerose variabili in gioco (fisiche, chimiche, biologiche, a evoluzione non-lineare) e le interazioni e retroazioni tra le loro parti costituenti (Preiser e altri 2018; De Vos e altri 2019). La scienza sta proponendo strumenti sempre più avanzati ed efficaci per trovare soluzioni agli attuali problemi ecologici globali, ma scienza e

tecnologia da sole non sono in grado di garantire soluzioni socialmente accettabili e rispettose dell'ambiente. È quindi necessario che i progressi scientifici e le applicazioni tecnologiche siano accompagnati da una discussione sulle loro implicazioni etiche e sociali, finalizzata a definire i confini di un'azione antropica capace di confrontarsi responsabilmente con la qualità della vita umana attuale e futura e con la conservazione degli altri elementi biotici e abiotici che costituiscono la Terra.

In questa prospettiva, lo sviluppo sostenibile delle società moderne richiede scienziati esperti delle dinamiche della Terra (i geoscienti), che siano anche consapevoli degli aspetti etici e sociali delle loro attività e che sappiano suggerire nuove, prudenti e lungimiranti modalità di interazione con la natura (Peppoloni e altri 2019).

Da alcuni anni nella comunità delle geoscienze sta crescendo la consapevolezza che al sapere tecnico-scientifico debba affiancarsi una riflessione filosofica e una prassi (individuale e sociale) che consideri l'interazione tra essere umano e sistema Terra come specifico oggetto di un'analisi in grado di definire le migliori modalità attuative di questa relazione, alla luce di valori condivisi che superino le differenze dei diversi contesti socio-ecologici e culturali.

Capire come funziona la Terra, in che modo intervenire sui suoi sistemi e processi naturali o come utilizzare le sue risorse sono attività che implicano grandi responsabilità, non solo di coloro che materialmente operano sul territorio, ma anche dell'intera comunità che vive su quel territorio e ne beneficia. I modi in cui sentiamo nostra una simile responsabilità condizionano anche la possibilità di individuare le azioni più efficaci per convivere con i rischi naturali da cui tutti siamo minacciati (terremoti, alluvioni, eruzioni vulcaniche, cambiamenti climatici, innalzamento del livello dei mari) e per far fronte ad altre emergenze globali quali l'inquinamento, la distruzione degli habitat e la riduzione della biodiversità, la degradazione e il consumo del suolo, lo sfruttamento incontrollato delle risorse naturali non rinnovabili, e non ultime le zoonosi. Del resto, la pandemia da Sars-CoV-2 è solo uno dei tragici effetti della crescente compromissione di equilibri già alquanto instabili tra le comunità umane e l'ambiente (Allen e altri 2017; Gibb e altri 2020; Morens – Fauci 2020). L'urbanizzazione e la deforestazione aumentano la prossimità, le possibilità di contatti e le occasioni di promiscuità tra le specie viventi, favorendo il salto di specie di agenti

infettivi (Quammen 2017; Morens - Fauci 2020). A quel punto virus e batteri cominciano a diffondersi anche tra gli esseri umani, soprattutto in situazioni di accresciuta vulnerabilità sociale dovuta a condizioni sanitarie precarie, incuria e ignoranza, o laddove le disuguaglianze sociali ed economiche sono più marcate.

Storicamente gli agenti patogeni infettivi (batteri e virus in particolare) hanno sempre rappresentato una delle maggiori minacce alla vita umana e i cambiamenti antropogenici globali accrescono questa minaccia. È indubitabile che le epidemie abbiano ucciso milioni di persone anche in tempi in cui l'impatto antropico sul pianeta e la numerosità della popolazione mondiale erano molto minori rispetto a quanto osservato negli ultimi 150 anni, ma è pur vero che nei secoli passati la medicina non poteva avvalersi dei moderni strumenti di prevenzione, contrasto e cura delle infezioni tra cui vaccini e antibiotici (Gallavotti 2019).

Tuttavia, se da un lato l'emergenza planetaria causata dalla pandemia Sars-CoV-2 ha forse indebolito la percezione comune dell'importanza delle questioni ambientali e della necessità di una transizione verso un'economia mondiale più sostenibile ed eco-compatibile, dall'altro lato ha accresciuto la consapevolezza dell'importanza dei comportamenti individuali nell'affrontare le minacce globali e della responsabilità personale nell'attuazione di qualsiasi strategia volta a ridurre l'impatto di tali minacce, come pure del bisogno di rafforzare istituzioni e accordi internazionali per far fronte a pericoli globali. A causa della chiusura delle industrie e delle attività commerciali in molte nazioni e dell'arresto del commercio internazionale durante le fasi più critiche della pandemia, l'economia globale è entrata in una fase di crisi dalle conseguenze più gravi di quelle sofferte durante la grande crisi economica del biennio 2008-2009!, con effetti devastanti sulle catene di approvvigionamento e sulle economie dei paesi in via di sviluppo, oltre ad aver determinato un forte aumento delle disuguaglianze?. Gli effetti negativi della pandemia hanno mostrato chiaramente fino a che punto le comunità umane siano interconnesse a livello planetario e quanto questo ci imponga di rispondere alle minacce globali con linguaggi, strategie e azioni comuni, attraverso organismi internazionali capaci di una visione a 360 gradi delle sfide da affrontare, in grado di pianificare interventi sulla base di dati e conoscenze provenienti da diverse parti del mondo, di aiutare ciascun paese nella definizione di specifici processi decisionali locali e delle migliori strategie di risoluzione dei problemi in base alle

proprie peculiarità sociali e culturali. Senza la creazione di organi decisionali internazionali che si occupino delle emergenze planetarie, l'umanità corre il rischio di trovarsi in futuro in nuove grandi crisi sistemiche, eventualità più probabile se le generazioni attuali non saranno in grado di prendere decisioni drastiche ed efficaci nel ridurre gli impatti antropici globali.

La geoetica nasce e si sviluppa per identificare i valori e i criteri etici che possono guidare la relazione che ci lega alla Terra, attraverso azioni in grado di garantire un equilibrio tra la conservazione dell'abitabilità del pianeta e lo sviluppo economico e sociale delle nostre società (Peppoloni e altri 2019; Peppoloni - Di Capua 2020), individuando uno spazio operativo sicuro per l'umanità (Rockström e altri 2009).

La geoetica è presa di coscienza che l'agente umano è un modificatore, solo in parte consapevole, degli ambienti naturali e dei territori in cui opera e vive, delle loro caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche, come anche dei tratti sociali e culturali che li connotano. L'azione antropica si compie oggi attraverso l'utilizzo di un imponente sviluppo tecnologico, che da un lato pone ulteriori problemi, dall'altro offre possibili soluzioni. I cambiamenti antropogenici sul pianeta influenzano a loro volta lo sviluppo economico e le prospettive sociali delle persone, e ci pongono di fronte alla necessità di considerare da differenti prospettive questioni cruciali come l'uso accorto delle risorse naturali e dell'energia, la difesa dai rischi naturali e antropogenici, la riduzione dell'inquinamento, la conservazione del suolo, la mitigazione del cambiamento ambientale globale e l'adattamento che tale cambiamento richiede. Ne discende la necessità di ampliare l'orizzonte scientifico attraverso una riflessione filosofica e sociologica, che approfondisca le questioni relative all'equità, alla giustizia intra- e intergenerazionale, all'accesso a un'istruzione di qualità, e che solleciti un'azione sul piano politico basata sull'ascolto, la prudenza, la saggezza e la lungimiranza.

Cambiamenti locali e globali antropogenici, rischi naturali, transizione verso nuovi paradigmi economici, sviluppo sostenibile sono temi che hanno travalicato l'ambito scientifico entrando nel dibattito pubblico mondiale. Nella sua enciclica *Laudato si'* anche papa Francesco sottolinea la necessità di una «conversione ecologica» dell'umanità, che porti ciascuno ad assumersi la responsabilità della «cura della casa comune» (Francesco 2015), dove per cura si intende quell'insieme di azioni

improcrastinabili sul piano ambientale, sociale e giuridico, volte ad accrescere l'attenzione verso i temi delle disuguaglianze, della povertà, della disponibilità condivisa delle risorse naturali, della necessità di una governance internazionale dei beni comuni globali che modifichi gli attuali modelli di sviluppo insostenibili.

I valori della geoetica possono essere sintetizzati in:

- Dare concretezza al sentire ecologico;
- Patrimonio biologico, geologico e bio-geo-conservazione;
- Sostenibilità;
- Adattamento;
- Prevenzione;
- Educazione ambientale.

#### 1.4.2 *Rischi naturali: stanno aumentando?*

I cambiamenti climatici e la sensibile discrasia tra uomo e natura, confrontano i tecnici, i pianificatori e i politici con uno scenario diverso e in evoluzione per i territori (Re, 2020).

Secondo i dati dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), se da un lato le precipitazioni medie annue non sono molto variabili, a cambiare invece è l'intensità dei singoli eventi di pioggia, con un aumento negli ultimi 100 anni nelle regioni del nord-ovest, nord-est e centro-est della penisola. Il rovescio della medaglia è rappresentato da un contemporaneo aumento dei fenomeni di siccità. La relazione tra il cambiamento climatico e l'aumento del rischio geo-idrologico e delle alluvioni in Europa è stata evidenziata da uno studio della Vienna University of Technology, pubblicato nel 2019 sulla rivista Nature, in particolare per l'Europa nord-occidentale. I danni a livello europeo sono stimati a oltre 100 miliardi di dollari ogni anno. Secondo i dati del Climate Risk Index di Germanwatch, per l'Italia si parla di 19.947 vittime dal 1999 al 2018 per eventi meteorologici estremi (sesto posto a livello mondiale). Si calcola che questi eventi, che includono alluvioni, tempeste e ondate di calore, hanno procurato in quel periodo un danno economico di 32,92 miliardi di dollari, pari al 2% del PIL.

### 1.4.3 Sostenibilità e resilienza dell'infrastruttura

Eventi catastrofici come frane e alluvioni possono avere un impatto significativo sulla società, in termini di pericolo per la vita, incidendo sulle attività umane e sull'operatività delle infrastrutture che ne sono alla base. Per far fronte a queste problematiche è fondamentale disporre di strumenti che possano consentire una corretta gestione e individuazione delle priorità in ragione della loro potenziale manifestazione.

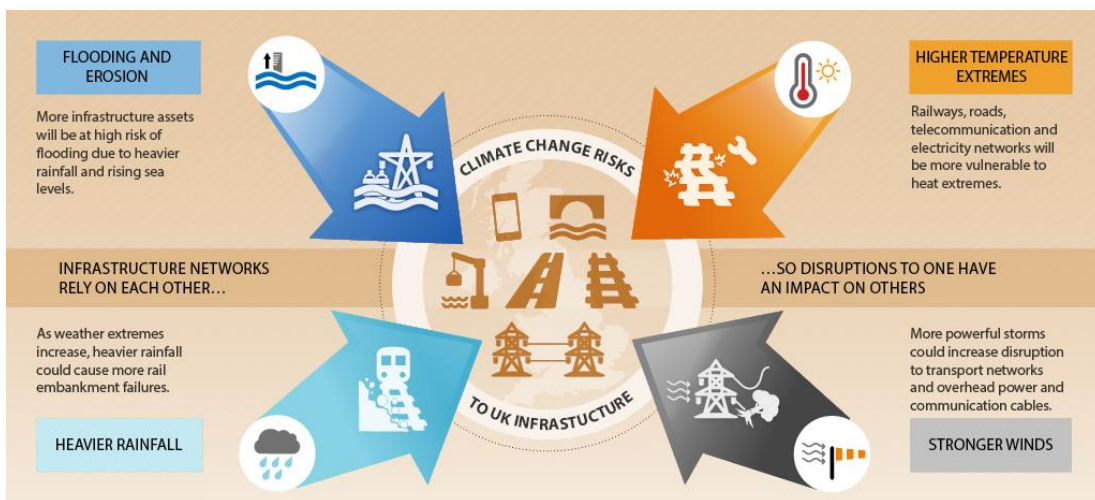
In particolare, nel mondo delle infrastrutture e dell'ingegneria civile si sta prendendo coscienza della necessità di strutturare meglio una rete di mantenimento delle opere e della prevenzione di eventi di grande portata, come dimostrato dai numerosi fondi stanziati per il rilancio dell'economia dei Paesi Europei. Questi possono causare ingenti danni non solo di tipo tecnico, ma anche di impatto sociale ed economico; danni che possono essere evitati o resi più gestibili da un corretto sistema di segnalazione e programmazione dell'allertamento e della manutenzione, sia essa ordinaria o straordinaria, nel rispetto dell'ambiente e del valore storico e sociale che le infrastrutture rappresentano.

La sostenibilità nella costruzione di nuove infrastrutture si concentra sulla ricerca e sull'applicazione di principi di economia circolare e riduzione degli impatti rispetto agli obiettivi ambientali della Tassonomia (i.e. principio DNSH). La sostenibilità di infrastrutture esistenti si basa principalmente sulla ricerca di processi di rilievo, ispezione e analisi, finalizzati a realizzare interventi di gestione che riducano gli impatti rispetto agli obiettivi ambientali della Tassonomia (principio DNSH e principio del Rischio Residuo).

La valutazione e l'attuazione della resilienza passa attraverso l'analisi del sistema complesso e della modularità dei principi di sostenibilità sovraesposti. La complessità dell'analisi per le infrastrutture è schematizzata in Figura 1-5 per l'obiettivo ambientale della Tassonomia di Adattamento e Mitigazione ai Cambiamenti Climatici richiamandone alcune aspetti base:

- Erosione ed erosione: più infrastrutture e opere d'arte avranno un rischio maggiore di essere tracimate a causa delle piogge più pesanti e intense (i.e. bombe d'acqua) e l'aumento del livello del mare;

- Bombe d'acqua: con l'aumento di eventi meteorici estremi e l'incremento di acqua meteorica in intervalli più brevi, i rilevati delle infrastrutture e le scarpate ivi interagenti avranno un rischio maggiore di collasso;
- Incremento delle temperature estreme: ferrovie, strade, telecomunicazioni e linee elettriche saranno più vulnerabili con l'esposizione a temperature estreme più alte e differenziali di temperatura sempre più alti;
- Venti più forti: tempeste più potenti potrebbero aumentare la vulnerabilità delle infrastrutture di rete ed energetiche, così come le linee di contatto elettrico e di telecomunicazione.



**Figura 1-5: Evoluzione normativa europea in materia sostenibilità (2021-2022).**

## Capitolo 2

### LE COMPONENTI ANALIZZATE DEL SISTEMA

#### 2.1 Introduzione

L'infrastruttura di trasporto è composta da molti elementi complessi e aleatori tra cui gli impianti, le telecomunicazioni, il segnalamento, l'armamento, l'elettrificazione. Le infrastrutture di trasporto possono essere classificate principalmente in infrastrutture stradali (trasporto su gomma) o ferroviaria (trasporto su rotaia). Questo lavoro si concentra sulle infrastrutture ferroviarie, ma le stesse considerazioni sono trasponibili alle infrastrutture stradali con le dovute differenze di sistema. Inoltre questo lavoro si concentra su alcune opere civili di linea ed alcuni elementi del territorio interferenti con l'infrastruttura, ovvero le componenti su cui poggiano o potenzialmente interagiscono gli elementi sopramenzionati e che sono fondamentali per garantire la sicurezza di lavoratori e utenti. Gli elementi che saranno presi in considerazione saranno:

- le gallerie;
- unità geomorfologiche, ovvero i versanti (naturali) e le scarpate (antropiche).

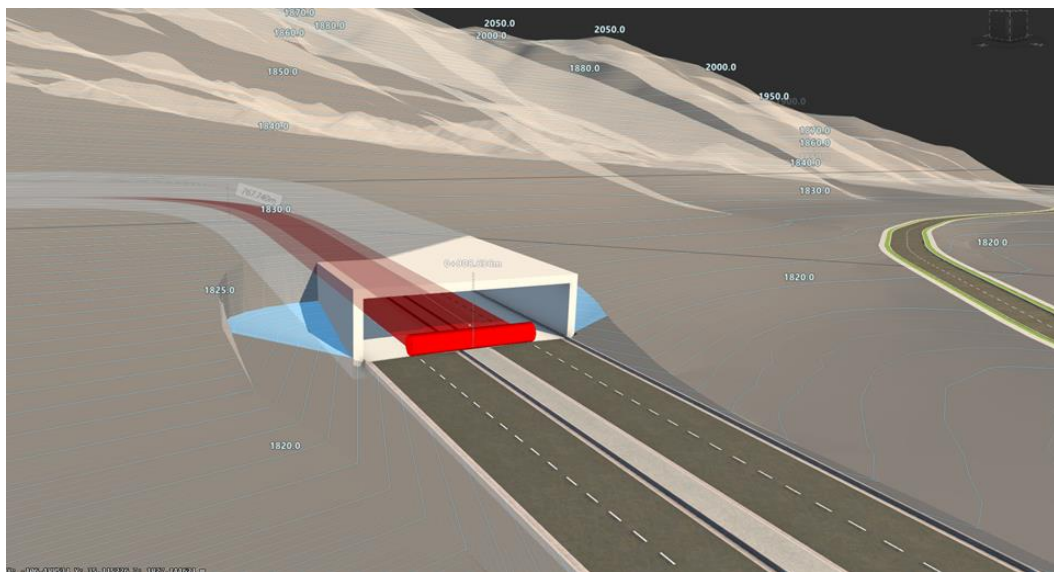
#### 2.2 Le gallerie

Tra le opere d'arte maggiori, oggetto del seguente lavoro sono le gallerie, che sono descritte nel seguito con maggiore dettaglio.

##### 2.2.1 Introduzione

Nel campo della ingegneria civile, una galleria è una perforazione del suolo approssimativamente orizzontale, nella quale domina la lunghezza sulle altre due dimensioni, e che mette in comunicazione due luoghi tra di loro. Le gallerie sono opere in sotterraneo, come tali possiedono un elevato grado di sicurezza verso eventi estremi, ma hanno anche una aleatorietà intrinseca che rende complesse le operazioni di

manutenzione, potenziamento o intervento in caso di eventi estremi impattanti o incidenti.



***Figura 2-1: Esempio di rappresentazione 3D di una galleria infrastrutturale con la rappresentazione del modello della superficie. Nell'immagine è raffigurata una galleria autostradale di forma scatolare (Autodesk, 2022).***

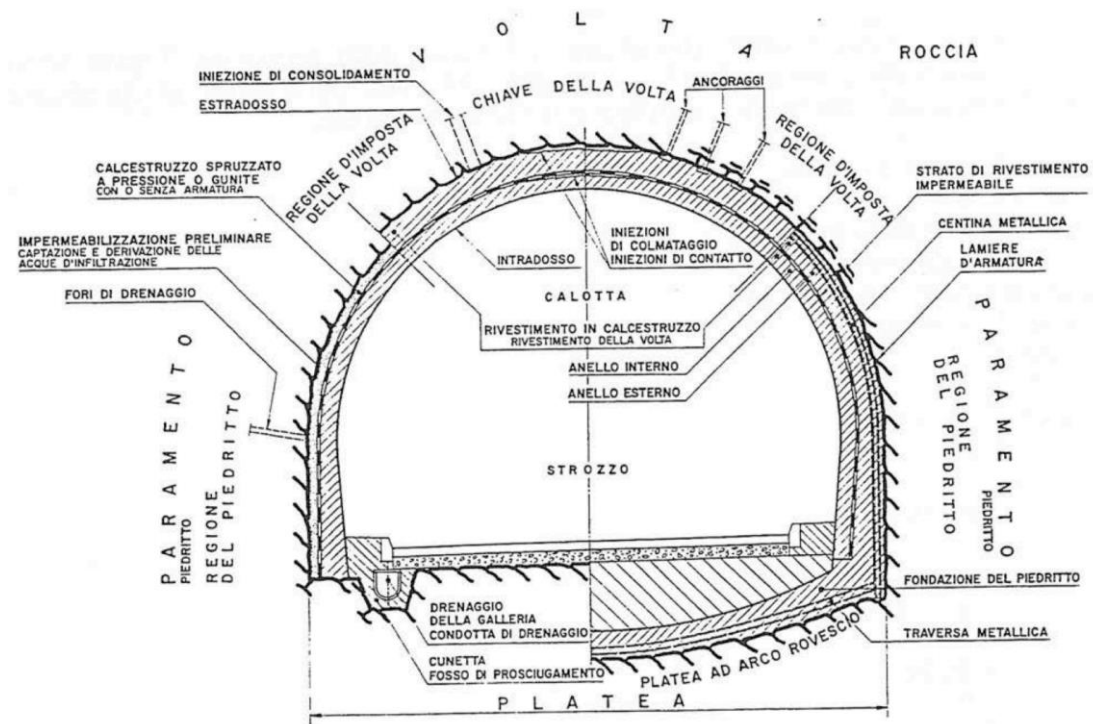
Alla loro realizzazione si ricorre, generalmente, quando lungo un tracciato si rinvencono rilievi morfologici il cui superamento attraverso opere esterne risulta particolarmente complesso e/ o oneroso, oppure quando vi sono preferenze di carattere ambientale e urbanistico allo sviluppo del tracciato in sottosuolo, oppure, ancora, quando il tracciato deve avere un andamento il più possibile rettilineo affinché si possano raggiungere elevate velocità (autostrade, alta velocità ferroviaria, etc.).

Le gallerie vengono suddivise in gallerie naturali e in gallerie artificiali.

Nelle prime, le rocce e/o i terreni inglobano completamente la sagoma della galleria appena scavata (scavo a foro cieco); nelle seconde, invece, la realizzazione della galleria è caratterizzata dal preliminare scavo di una trincea, da una successiva fase di esecuzione delle opere strutturali (scavo a cielo aperto), a cui può far seguito una terza fase di ricopertura completa dell'opera stessa.

Con il termine traforo vengono denominate quelle gallerie che attraversano uno spartiacque generalmente di una certa importanza, mentre con il termine cunicolo si intende uno scavo ausiliario di luce più ridotta rispetto a quella dell'opera principale, avente, in genere, finalità esplorativa o drenante. Questi cunicoli possono inoltre essere

utilizzati per eseguire interventi di consolidamento atti a migliorare le caratteristiche geomeccaniche dei materiali interessati dalla galleria principale.



**Figura 2-2: Sezione tipo e termini indicanti le varie parti di una galleria. Nell'immagine l'esempio di una galleria stradale (Castelli, 2012).**

Il progresso nella costruzione di gallerie ha ovviamente subito una grandissima accelerazione negli ultimi 300 anni, a causa dei progressi tecnologici raggiunti nel campo delle costruzioni. La costruzione di gallerie conobbe, tuttavia, solo verso la metà del 1800 una prima larga diffusione passando da pratica pressoché artigianale ad una vera e propria concezione industriale come in altri settori della tecnologia. Ciò fu causato dalla nascita del trasporto ferroviario che richiedeva di superare i rilievi montuosi con pendenze modeste. Furono così realizzati i primi trafori alpini di notevole lunghezza (oltre i 10 km), alcuni a sezione trasversale notevolmente più ampia delle gallerie tradizionali del passato (con area di superficie superiore ai 40 m<sup>2</sup>), la cui realizzazione fu possibile grazie agli apporti di nuove tecnologie (prima perforatrice ad aria compressa, usata per lo scavo della galleria del Fréjus nel 1861, invenzione della dinamite nel 1867, introduzione dell'abbattimento con dinamite nel 1872).

Ancora al 1800 si deve l'ideazione dello scudo per lo scavo di gallerie in terreni sotto falda, con particolare riguardo all'uso dell'aria compressa per il sostegno del fronte, nonché del primo tentativo di creare una macchina di scavo continuo ed integrale a testa rotante (macchina di Beaumont per lo scavo della galleria della Manica, 1884).

Negli anni sessanta del 1900 si riprende l'idea di Beaumont ed è sviluppata la pratica dello scavo meccanizzato mediante macchine di scavo continuo ed integrale (macchina Robbins in scisti teneri nel 1954) che oggi si sta sempre più diffondendo con successo in alternativa al classico e tradizionale scavo con esplosivo, mentre negli anni '70 è introdotto l'uso delle perforatrici idrauliche.

Per ciò che riguarda lo scavo in terreni, lo sviluppo dei metodi di consolidamento o pre-rinforzo e degli scudi meccanizzati in grado di sostenere il fronte con fluidi di versi dall'aria compressa, offre al progettista una vasta scelta, per quanto concerne sia i metodi sia i mezzi, anche nelle situazioni più difficili.

Altro sviluppo importante è costituito dall'apertura di gallerie sottomarine di grande lunghezza: il primo esempio è costituito dalla galleria ferroviaria del Seikan (Giappone), di circa 53 km (1964-1983) e dalla galleria ferroviaria della Manica recentemente costruita. Un esempio del progresso che si è attuato nel campo è visibile

confrontando la galleria ferroviaria, scavata nel 1872-78, e la galleria autostradale del S. Gottardo aperta nel 1969-80.

**Tabella 2-1: Evoluzione dei principali parametri di costruzione delle gallerie tra il 1872 e il 1980 (Castelli, 2012).**

Anno	Lunghezza (km)	Sezione (m <sup>2</sup> )	avanzamento (m/d)	N. Operai	Incidenti mortali
1872-81	14,9	45	3,5-4 (1)	2500-4000	177 (5,4 %)
1969 -80	16,3	82-96	6 (2)	700	12 (1,7 %)

(1) Lavoro su due turni di 12 ore per 7 giorni la settimana

(2) Lavoro su due turni di 10 ore su 5 giorni la settimana.

### 2.2.2 Tracciato

Di norma il tracciato delle gallerie è stabilito in relazione allo scopo.

I punti di imbocco e sbocco sono spesso determinati in relazione al complesso operativo di cui la galleria è parte (strada, impianto idroelettrico, miniera etc.).

Talvolta i punti di imbocco (portali) possono essere scelti in base a considerazioni geologiche, quali:

- la presenza sul tracciato di zone difficili in rapporto alla statica;
- l'imbocco e sbocco in zona di frana o valanghe;
- l'imbocco in zone di difficile sistemazione dei cantieri e dei servizi.

Il tracciato di una galleria è quindi il risultato di un compromesso tra le esigenze legate all'uso della galleria e quelle legate alla costruzione. Generalmente prevalgono le prime. Vi è la tendenza attuale a non subordinare sempre le esigenze costruttive a quelle dell'utilizzazione e ciò per evidenti problemi di tipo economico. In particolare:

- Gallerie stradali. Sono ammesse curve nei limiti consentiti dalla classe della strada e quindi dalla velocità massima dei veicoli: per esempio per le strade di I categoria (secondo le norme) curve da 4.000 ÷ 6.000 m di raggio e pendenze ammesse non superiori al 6 per cento e, generalmente, non superiori a quelle delle strade di classe corrispondente all'aperto. L'esecuzione di apposite curve permette di superare le pendenze non accettabili;

- Gallerie ferroviarie. Le curve hanno il raggio definito in funzione della velocità dei convogli. La pendenza è minore rispetto al corrispondente tracciato all'aperto a causa della possibile minore aderenza dei convogli dovuta all'umidità. Non è questo tuttavia in generale il problema delle ferrovie metropolitane che possono subire una migliore manutenzione in confronto a quelle ordinarie. Lo sviluppo dei metodi di impermeabilizzazione dei rivestimenti delle gallerie riduce poi notevolmente il problema. Nelle gallerie ferroviarie occorre anche tener conto della resistenza dell'aria per cui la pendenza superabile dovrebbe essere ridotta. Molto diffuse in passato furono le così dette gallerie ferroviarie a spirale, atte a superare notevoli dislivelli tra gli imbocchi.

### 2.2.3 Sezione trasversale

Per ciò che riguarda la forma e la superficie della sezione trasversale delle gallerie la scelta è dominata dai seguenti fattori:

- scopo della galleria (per esempio: ingombro dei mezzi di passaggio);
- statica (profondità sotto la superficie del suolo, carichi geostatici rilevanti od eccentrici);

- mezzo di scavo.

Si distingue la sezione utile (od interna) che deriva dalla destinazione della galleria, dalla sezione di scavo (od esterna) che consegue dalla sezione utile, a seconda del tipo e caratteristiche geometriche dei sostegni o rivestimenti utilizzati. Talvolta, ma raramente, la sezione utile e la sezione di scavo coincidono: ciò avviene specialmente per piccole gallerie temporanee che non richiedono l'armatura per la buona stabilità (alcune gallerie di miniera, o gallerie di servizio vario che, terminata la loro funzione in breve tempo, sono abbandonate).

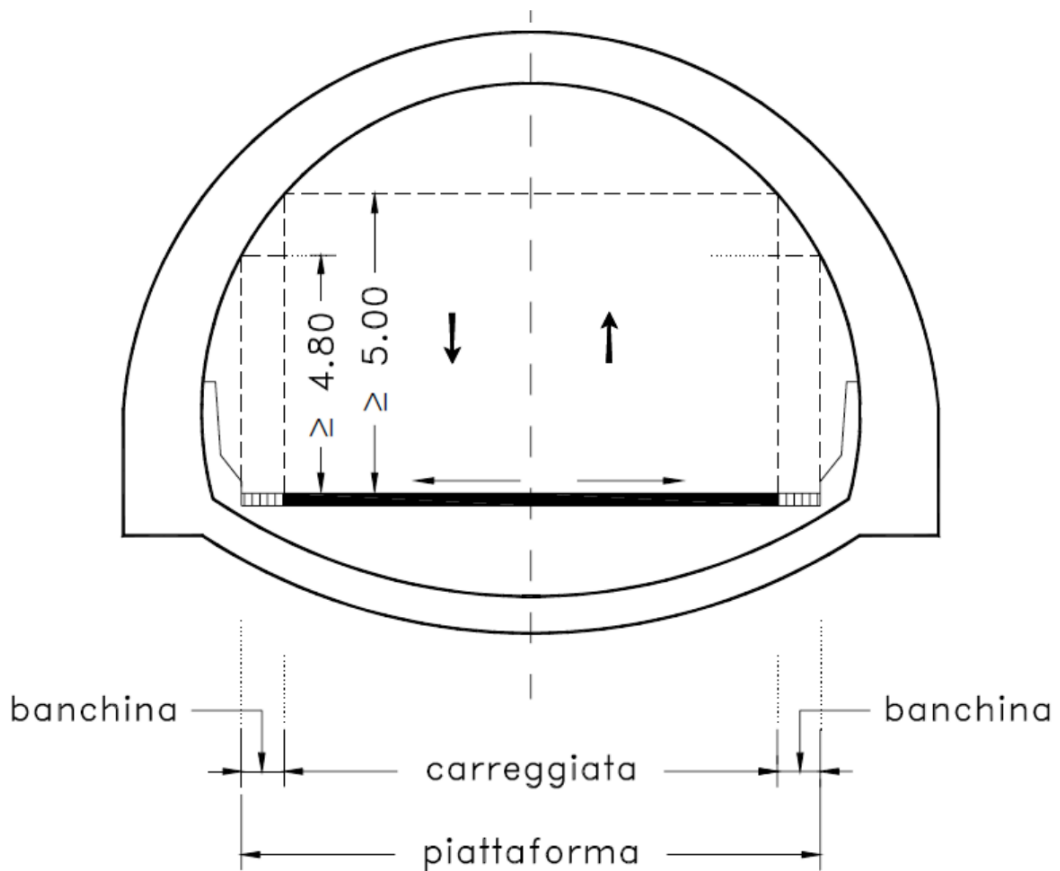
In alcuni casi le sezioni sono normalizzate da alcuni enti; il fattore dominante è comunque quello relativo allo scopo della galleria da cui deriva l'interesse economico (mediante il quale si paga la costruzione della medesima). Gli altri fattori risultano di norma subordinati.

- Gallerie stradali (Figura 2-3). Le sezioni sono normalizzate secondo le “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade, 2001): le dimensioni delle sedi stradali in funzione della classe della strada. La sezione di una galleria stradale dipende dunque dalla classe della strada, quindi dalla sua larghezza e dall'altezza della sagoma limite, oltre che dagli spazi destinati ai servizi. Le forme più efficaci per sfruttare adeguatamente la sezione sono quelle a ferro di cavallo o policentriche (Figura 2-3). Per le strade a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico (tipo A, B e D) devono prevedersi gallerie a doppio foro. In tutti i casi l'altezza libera nella galleria, misurata sulla verticale a partire da qualsiasi punto della piattaforma, non deve essere inferiore a metri 4.80. Nel caso di controsoffitto o di intradosso piano (galleria in artificiale) o di presenza di apparecchi sospesi, il franco libero in corrispondenza alla carreggiata non deve essere inferiore a metri 5.00. Ciò, salvo il caso di strade a traffico selezionato con altezza di sagoma limite ridotta. Gli schemi di sezione illustrati nelle figure individuano lo spazio minimo necessario in corrispondenza della piattaforma; il progettista dovrà adeguare la sagoma in relazione alle esigenze connesse alla dislocazione di elementi marginali necessari (segnaletica stradale, marciapiedi di servizio protetti, canalizzazioni, etc.). Le dimensioni delle banchine laterali in destra ed in sinistra, richiamate nel presente paragrafo per i diversi tipi di strada, si intendono come valori minimi, eventualmente da

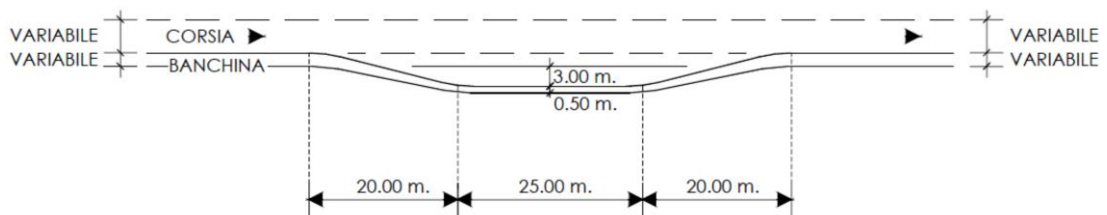
incrementare qualora le verifiche di visibilità ne dimostrino la necessità. Le superfici aggiuntive rispetto i valori minimi devono essere trattate per scoraggiarne l'utilizzo da parte degli utenti. Per gallerie di lunghezza superiore a 1.000 m devono essere previste piazzole di dimensioni minime 45 x 3 m con interdistanza di 600 m per ogni senso di marcia (Figura 2-4); nel caso di galleria a doppio senso di marcia le piazzole sui due lati devono essere sfalsate. Per gallerie a doppio fornice devono essere previsti collegamenti pedonali ogni 300 m e collegamenti per il passaggio di veicoli di soccorso o di servizio ogni 900 m. Sono rinviati ad apposita normativa specifica tutti gli apprestamenti ulteriori di sicurezza attiva e passiva (illuminazione, ventilazione, sorveglianza, impianto antincendio, uscite di emergenza, cavedi di servizio, ecc.).

- Galleria ferroviaria (Figura 2-5). Per quanto concerne la progettazione della sezione la Società RFI ha redatto il “Manuale progettazione gallerie” che costituisce una documentazione di riferimento nell'attività di progettazione delle gallerie ferroviarie italiane. Nel manuale vengono specificati tutti gli elaborati che bisogna predisporre a seconda del livello progettuale che si intende raggiungere (preliminare, definitivo, esecutivo). Le indicazioni presenti nel manuale vengono applicate per la progettazione di gallerie nuove sia naturali che artificiali. Per quanto riguarda la scelta dello schema di configurazione delle gallerie, il progettista, fino a 1000 m, potrà scegliere di realizzare gallerie a singolo foro e doppio binario o gallerie a doppio foro e singolo binario; per gallerie comprese fra 1000 e 2000 m potrà scegliere se realizzare la galleria a singolo o a doppio foro con la raccomandazione di preferire la soluzione a doppio foro; per gallerie di lunghezza superiore a 2000 m dovrà prevedere la soluzione a doppio foro. Il piano di calpestio deve avere una pendenza dell'1% verso l'interno della galleria. Nelle gallerie ferroviarie sono presenti le nicchie, i nicchioni e le camere di deposito. Le nicchie sono adibite al ricovero del personale della manutenzione, devono avere un interasse di circa 25 m senza, però, superare i 30 m; devono possedere una larghezza di 2.40 m, un'altezza di 2.20 m ed una profondità di 0.80 m. Le camere di deposito vengono realizzate nel caso di tunnel superiori ai 2 km se richieste dal committente ed hanno una distanza che solitamente varia fra 1 e 1.5 km; hanno una lunghezza di 12 m, una sezione ad ovoide con larghezza di

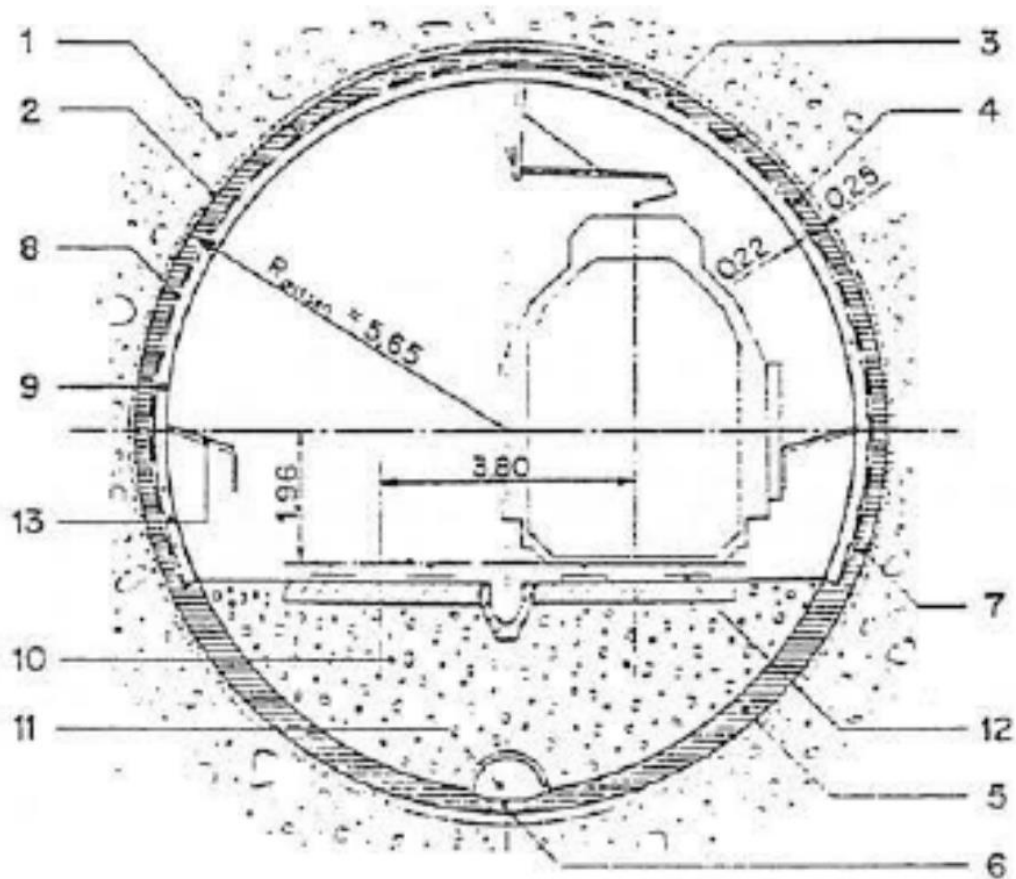
3,80 m alla base e altezza di 4.50 m alla chiave. Le camere di deposito vengono utilizzate per il deposito di materiali, apparecchiature meccaniche, etc.



**Figura 2-3: Sezione tipo di galleria stradale di tipo A con gli elementi principali che la compongono (Castelli, 2012).**



**Figura 2-4: Piazzole di sosta e dimensioni minime. Esse devono essere distanziate l'una dall'altra in maniera opportuna ai fini della sicurezza della circolazione ad intervalli di circa 1.000 m lungo ciascuno dei due sensi di marcia (Castelli, 2012).**



*Figura 2-5: Sezione tipo di gallerie ferroviaria e principali elementi che la compongono (Castelli, 2012). 1)roccia sciolta; 2) iniezioni; 3) rivestimento in volta; 4) rivestimento in piedritto; 5) rivestimento alla suola; 6) filtro di ghiaia; 7) bandella; 8) impermeabilizzazione; 9) rivestimento interno; 10) ballast e sub-ballast ovvero ghiaia di riempimento; 11) drenaggio; 12) binari; 13) cunicolo protetto.*

#### 2.2.4 Cenni delle opere non analizzate

Come menzionato precedentemente, il seguente lavoro si concentra principalmente sulle gallerie, tralasciando altri elementi Maggiori dell'infrastruttura, come i ponti, i viadotti, le grandi opere di sostegno e/o contenimento, etc. che risultano comunque trattati nell'attuale letteratura tecnico-scientifica e normativa.

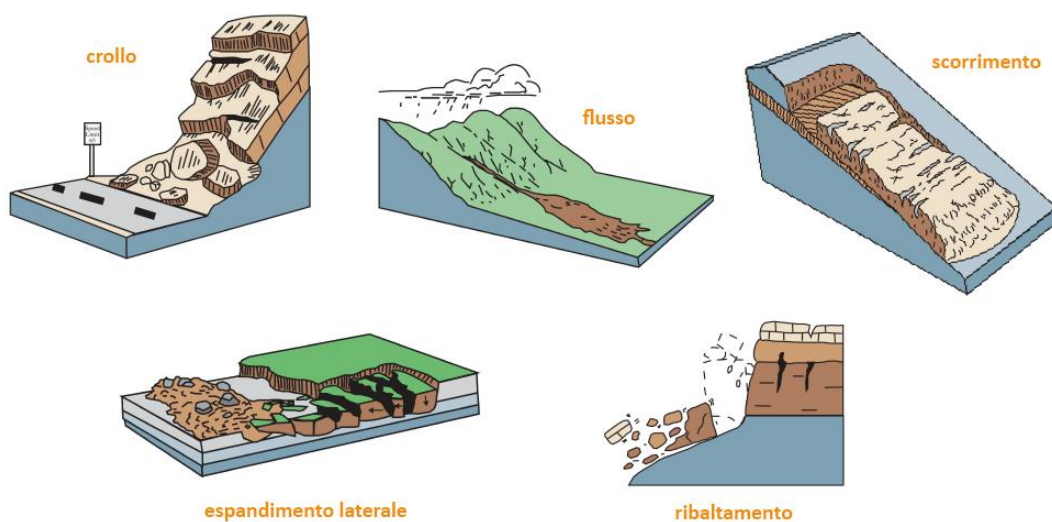
### 2.3 Il dissesto idrogeologico

Il dissesto idrogeologico è l'insieme dei processi geomorfologici che producono la degradazione del suolo e l'instabilità o la distruzione delle costruzioni che sono

localmente presenti; esso comprende tutti i processi naturali e antropici che corrompono un territorio, a partire dall'erosione superficiale o sotterranea, fino agli eventi più impattanti quali frane e alluvioni. Questo lavoro si concentra sul rischio geomorfologico (frane) e, per limitazione della trattazione, non tratta i rischi idraulici. Per questo motivo gli elementi presi in considerazione sono i versanti (naturali) e le scarpate (antropiche).

### 2.3.1 Versanti e Scarpate

I versanti (naturali) e le scarpate (antropiche, e.g. versanti naturali soggetti a scavi/tagli per la realizzazione di un corridoio infrastrutturale) sono i principali elementi potenzialmente in frana come elemento del territorio lungo l'infrastruttura (dissesto idrogeologico). Una frana è uno spostamento naturale verso il basso, più o meno rapido, di cospicue masse di materiali terrosi e rocciosi; anche, la cavità prodotta da tale spostamento sulla superficie di distacco e il cumulo del materiale al basso. Questo materiale può interferire spesso con la linea causandone l'impatto con convogli (trasporto ferroviario) o veicoli (trasporto stradale) con rischio per la vita umana, di cospicue perdite economiche e complicazioni nella gestione della linea.



**Figura 2-6: Principali tipi di movimento delle frane (Landslide type e process. USGS 2004).**

Le cause di una frana possono essere varie e complesse, in genere causate da un incremento degli sforzi agenti sul versante o da una riduzione della resistenza del

sottosuolo. Per una corretta visione d'insieme, nel seguito si riassumono i principali fattori di influenza che rientreranno nelle formule di analisi (Dalla Fontana, 2013):

- Fattori litologici: versanti in roccia si comportano in modo differente rispetto a quelli costituiti da materiale sciolto. I primi sono maggiormente soggetti a fenomeni di distacco localizzato, in serie o globale (crollo, ribaltamento), mentre i secondi sono soggetti a fenomeni di espansione, scorrimento e flusso;
- Fattori strutturali: la disposizione nello spazio degli strati determina la maggior o minore possibilità di instabilità;
- Fattori morfologici:
  - Acclività: minore è la pendenza del versante, maggiore è la sua stabilità;
  - Conformazione: una pendenza uniforme rende il versante maggiormente dilavabile dall'acqua;
  - Altezza: più è alto il versante, minore è la sua stabilità;
- Fattori idrogeologici:
  - Permeabilità: maggiore è la permeabilità, maggiore potrebbe essere la stabilità del versante;
  - Vegetazione: un versante vegetato è più stabile di uno nudo;
- Fattori antropici:
  - Disboscamento;
  - Scavi su versante;
  - Sovraccarico dovuto alla presenza di edifici, costruzioni o variazioni del territorio;
  - Variazione del regime idrogeologico del territorio.

### *2.3.2 Cenni delle componenti non analizzate*

Come menzionato precedentemente, non sono oggetto del seguente lavoro le opere d'arte minori, le opere idrauliche, le opere ambientali, se non nella misura di elementi minori contenitivi per le unità geomorfologiche.

## Capitolo 3

### GESTIONE DELLE PRIORITÀ E DEL RISCHIO

#### 3.1 Asset Risk Management

In questo capitolo si descrivono i principi, dapprima generali di sistema, e poi specifici per la gestione degli asset (componenti) infrastrutturali introdotti al capitolo precedente.

##### 3.1.1 *Asset Management*

Gestione del patrimonio infrastrutturale è un processo strategico e sistematico per esercitare, mantenere, migliorare ed espandere una rete di infrastrutture di trasporto in modo efficace durante tutto il suo ciclo di vita e ingloba molti più aspetti di quelli richiamati nel seguito, quali il Sistema di Gestione della Sicurezza (SGS), sistemi integrati e altri processi organizzativi e procedurali non strettamente tecnici nella valutazione delle prestazioni di sicurezza. Esso si basa su procedure ingegneristiche ed economiche per l'allocazione e l'utilizzo delle risorse con la finalità di migliorare il processo decisionale facendo riferimento da un lato ad informazioni di qualità e dall'altro a ben definiti obiettivi [NCHRP Report 632].

Molti gestori hanno già sviluppato diversi elementi del processo di gestione del patrimonio, che formano parte integrante delle procedure di gestione utilizzate, pertanto lo scopo di questa guida è quello di fornire ai gestori un indirizzo per l'ulteriore sviluppo ed il miglioramento delle procedure per la gestione del patrimonio infrastrutturale già utilizzate.

Nello schema rappresentato nella figura sottostante, sono rappresentate tutte le attività ed i processi che sono necessari allo sviluppo dei documenti di pianificazione e programmazione ed all'implementazione ed al miglioramento delle pratiche di gestione del patrimonio di infrastrutture viarie. È importante che le attività svolte e l'approccio scelto dal gestore per lo svolgimento dell'attività stessa siano chiaramente

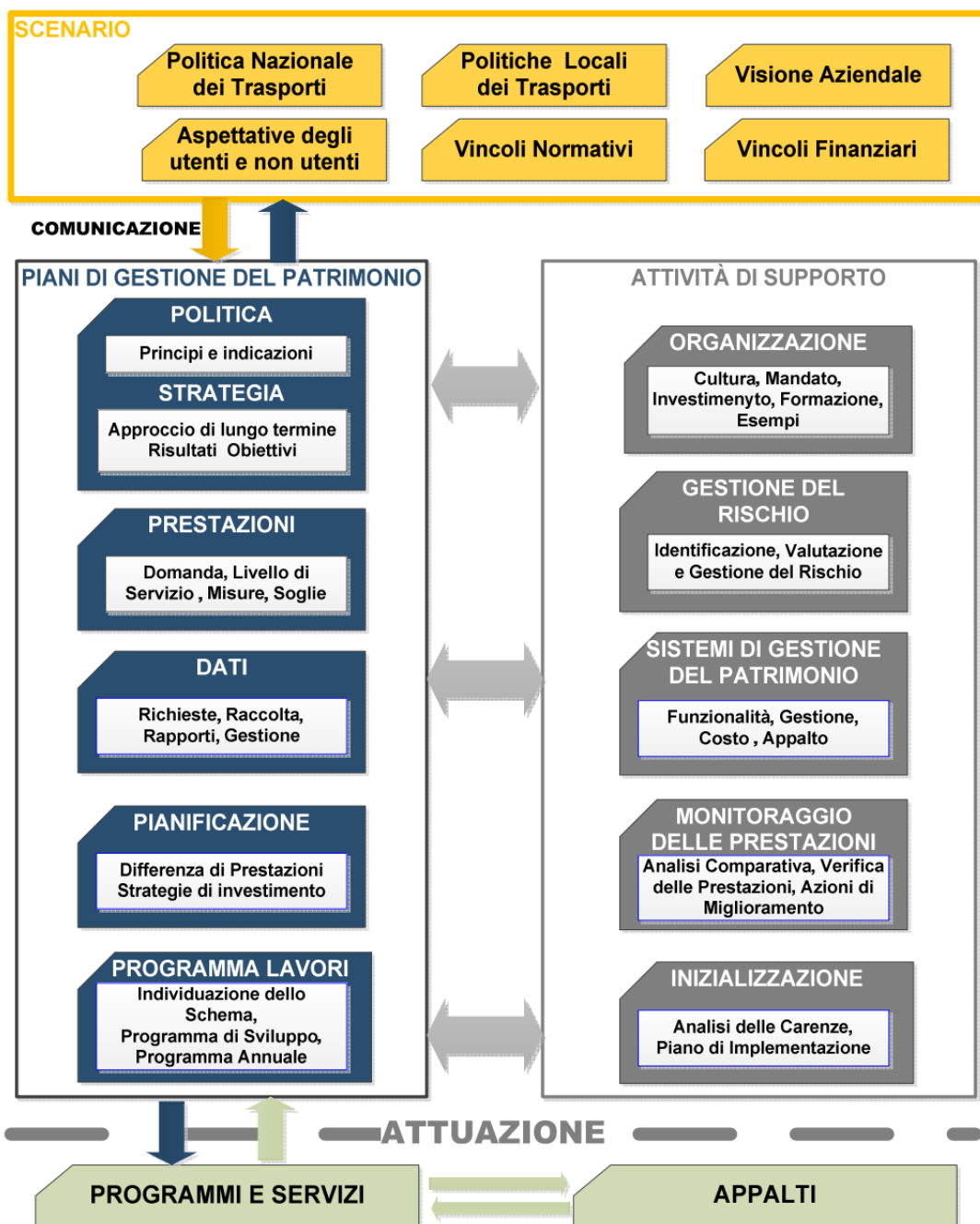
documentate e accessibili a tutti i soggetti interessati e coinvolti dalle attività di gestione.

Un sistema di gestione degli asset può essere sviluppato in riferimento alla norma BS ISO 55000 ed alla guida sviluppata nel Regno Unito [HMEP 2013] e articolato in tre macro-sezioni:

- il contesto: descrive gli scenari infrastrutturali, organizzativi e territoriali all'interno dei quali si svolgono le attività di gestione della rete di infrastrutture;
- la Pianificazione: descrive le attività ed i processi fondamentali per la pianificazione e fornisce indicazioni su come tali attività possano essere svolte ai fini della gestione del patrimonio infrastrutturale;
- gli elementi di supporto: descrive gli aspetti e gli elementi che supportano la corretta attuazione delle procedure di gestione del patrimonio di infrastrutture descritte nello schema.

La gestione dell'asset di una infrastruttura richiede a livello dell'intera rete e della singola componente, dei seguenti milestones minime:

- Anagrafica gerarchizzata delle opere georeferenziate anche su modello digitale:
- Schede difettologiche conformi alle linee guida del Ministero delle Infrastrutture che rappresentano tutte le anomalie riscontrate nel corso dell'ispezione e dell'analisi degli elementi in tutte le loro componenti;
- Ispezioni fisiche registrate dal sistema ed effettuate da operatori in linea;
- Monitoraggio dinamico, grazie alla raccolta e classificazione dei dati acquisiti da droni, sensori, pese dinamiche, accelerometri ed ogni altra tecnologia di campo;
- Attivazione combinata ed integrata dei lavori di manutenzione ordinaria e straordinaria;
- Reportistica per il management, le funzioni aziendali e AINOP (Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche).



**Figura 3-1: Quadro sinottico schematico delle attività e delle fasi della gestione del patrimonio di infrastrutture viarie (Convegno Nazionale AIPCR, CT 4.1 Gestione patrimonio stradale, 2014)**

Nella gestione degli asset assumono un ruolo fondamentale le ispezioni periodiche, che sono le visite di controllo effettuata ai sensi degli art. 11 e 12 del D.Lg.vo 264/06 (e successivi decreti), al fine di verificare le conformità dell'opera e di riscontrare la situazione reale rispetto a quanto risulta dalla documentazione agli atti e verificare il

mantenimento o meno delle condizioni di sicurezza accertate nella precedente visita ispettiva. Tale ispezione viene ripetuta con cadenza regolare in base alla classe di rischio associata e viene suddivisa in:

- Ispezione ordinaria: effettuata con frequenza di 3-6 mesi con rischio Medio-Alto, Alto e annualmente con rischio Medio, Medio-basso, l'ispezione ha lo scopo di determinare le condizioni e la funzionalità di tutte le componenti;
- Ispezione principale: eseguita con frequenza da 1 a 3 anni per tutte le classi di rischio, l'ispezione consistente in un esame visivo di tutte le parti ed evidenzia l'eventuale necessità di ulteriori approfondimenti;
- Ispezione generale: svolta ogni 6 anni, questa ispezione viene eseguita da ingegneri qualificati eventualmente assistiti da specialisti esterni ed è eseguita con l'ausilio di mezzi adeguati;
- Ispezione straordinaria: visita specialistica o a seguito di eventi eccezionali, svolta ai sensi degli art. 11 e 12 del D.Lg.vo 264/06. L'ispezione straordinaria specialistica viene associata alla visita ordinaria, nel caso in cui durante quest'ultima vengano rilevate anomalie o pericolosità che necessitano maggiori approfondimenti; l'ispezione straordinaria a seguito di eventi eccezionali viene effettuata dopo eventi quali sismi, alluvioni, urti. Entrambi i tipi di ispezione straordinaria devono rilevare le condizioni reali della galleria e verificare le condizioni di sicurezza.

### 3.1.2 *Analisi di rischio e di priorità*

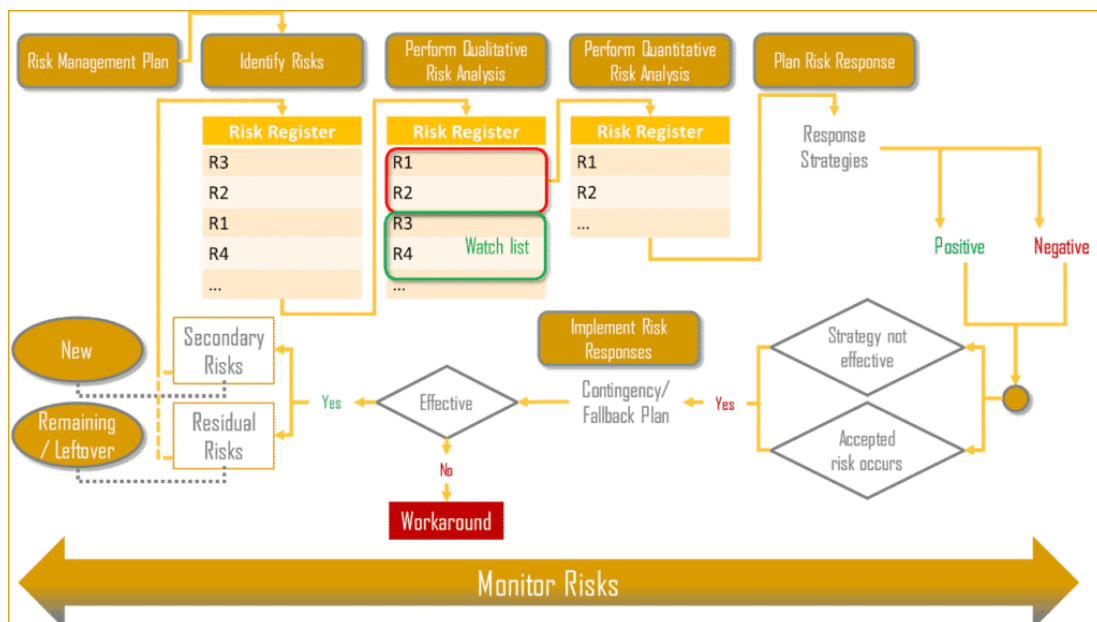
La gestione del rischio è un elemento a supporto dei processi decisionali pianificatori, essa costituisce una disciplina a sé stante i cui principi sono contenuti nella norma Risk Management [ISO 31000]. Questa guida non si prefigge l'obiettivo di fornire gli strumenti di attuazione delle procedure di analisi del rischio, ma ha come finalità quella di illustrare come essa possa integrarsi e sostenere il processo di pianificazione della gestione patrimoniale delle infrastrutture.

Un rischio può essere definito come un evento incerto, che, se dovesse accadere, avrebbe un effetto sulle prestazioni desiderate di uno o più elementi della rete di infrastrutture stradali. Il rischio è costituito da una combinazione della probabilità che si verifichi un evento negativo o positivo (pericolosità), e dell'entità delle conseguenze che esso può avere (danno = vulnerabilità x esposizione). Si definiscono:

- Minaccia un evento incerto che potrebbe avere un impatto negativo sui livelli di servizio;

- Opportunità un evento incerto che potrebbe avere un impatto favorevole sui livelli di servizio.

Le Amministrazioni ed i Gestori delle reti sono chiamati a gestire una varietà di rischi a livello strategico, tattico e operativo. La probabilità di accadimento e le conseguenze di questi rischi possono essere utilizzati per impostare la strategia di gestione delle infrastrutture e per definire le decisioni fondamentali riguardo alle prestazioni, agli investimenti e all'attuazione di programmi di lavoro. Quindi, per garantire un quadro di gestione efficace, si richiedono una valutazione ed una comprensione approfondite dei rischi e delle conseguenze.

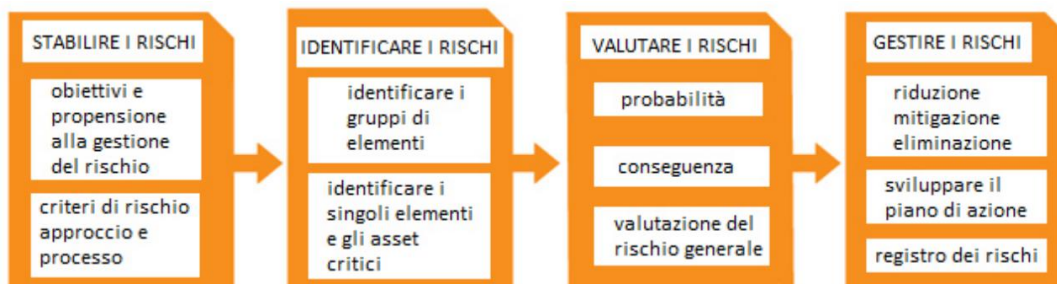


**Figura 3-2: Panoramica sulla gestione del rischio (PMI, 2017; ISO 31000)**

La sicurezza rappresenta sicuramente il rischio più usualmente percepito per le reti di infrastrutture, tuttavia esiste una vasta gamma di altri rischi e la loro identificazione e valutazione è una parte cruciale del processo di gestione. I rischi possono comprendere:

- Sicurezza;
- Reputazione;
- Perdita o danno al patrimonio;
- Riduzione o perdita del servizio;

- Continuità dell'esercizio;
- Ambiente;
- Aspetti finanziari;
- Aspetti contrattuali.



**Figura 3-3: Processo di gestione del rischio (Convegno Nazionale AIPCR, CT 4.1 Gestione patrimonio stradale, 2014)**

L'analisi dei rischi può essere qualitativa o quali-quantitativa (Perform Qualitative Risk Analysis), che assegna le priorità ai rischi per ulteriori analisi (Indice di Priorità), o quantitativa (Perform Quantitative Risk Analysis), che valuta nel dettaglio l'esposizione al rischio del progetto quantificando numericamente gli effetti dei rischi identificati. La valutazione qualitativa parte da una valutazione quantitativa, numerica o per classi, che vengono raccolte in categorie di priorità. Oltre a queste definizioni, si affianca la definizione della Classe di Attenzione (CdA) che rappresenta una stima preliminare dei fattori di rischio e si instaura, in genere, precedentemente alle analisi di rischio.

Il rischio può essere gestito a diversi livelli attraverso consistenti procedure di analisi (Risk Framework) che permettano il confronto dei rischi presenti in infrastrutture, o parti dell'infrastruttura, differenti. I rischi possono essere raggruppati in:

- Aziendali, ovvero Alto livello di rischio per l'intero Ente: tali rischi includono la reputazione aziendale, la protezione civile, le emergenze; la continuità delle attività, la salute e la sicurezza, il rischio politico, giuridico e finanziario. La gestione di tali rischi è di solito affidata ai decisori, ai vertici dell'organo di gestione ed è fuori dagli obiettivi di questo lavoro, che propone tecnologie e metodologia per la definizione delle Priorità a supporto delle decisioni degli organi gestori e della catena attuativa delle stesse;

- Strategici e tattici: sono i rischi che riguardano le attività di gestione dell'infrastruttura;
- Operativi: rischi da considerare quando si intraprendono le attività operative legate alla gestione e alla manutenzione.

È consigliabile applicare criteri e procedure di gestione del rischio uniformi in tutti gli ambiti in cui l'Amministrazione, o il Gestore, sono coinvolti compreso quello della gestione del patrimonio di infrastrutture. Questo soprattutto per permettere la registrazione dei rischi in un unico ambiente e permetterne raffronti e proiezioni per impostare le strategie future, e non solo per la valutazione complessive delle performance. Nell'analisi del rischio si dovrebbero considerare i seguenti aspetti:

- Natura del servizio – L'evento può influenzare l'approccio alla gestione del patrimonio stradale?
- Legislazione – Quali aspetti di gestione del rischio sono determinati da norme cogenti (p.e. salute, sicurezza pubblica, impatto ambientale, etc.)?
- Costo – Lo sforzo impiegato nella valutazione e nella gestione del rischio è proporzionale alle conseguenze eventualmente prodotte dall'evento?

Per supportare la gestione dell'infrastruttura, gli Enti Gestori dovrebbero avere una visione di:

- Quali attività sono fondamentali per il funzionamento della rete;
- Cosa potrebbe influenzare il raggiungimento delle prestazioni richieste, comprese le aspettative degli stakeholder;
- Livello di finanziamento;
- Livello di rischio accettabile;
- Opzioni per mitigare tutti i rischi ritenuti inaccettabili.

### **3.2 Definizione rischio-specifica**

Nella gestione dei rischi, risulta fondamentale definire gli eventi e la loro pericolosità per gli elementi analizzati. In questo capitolo si definiscono tali eventi e la successiva razionalizzazione negli indicatori di rischio da impiegare nelle analisi per gli elementi oggetto di questo studio.

### 3.2.1 Gallerie

Con emanazione del decreto del MIMS del 1° agosto 2022 e l'uscita in GU del 23 agosto 2022, sono state rilasciate le LLGG per la Classificazione del Rischio delle Gallerie, che saranno prese a riferimento a livello metodologico e poi connotate con metodologie e strumenti innovativi. Anche se riferite a gallerie stradali, le attuali LLGG sono in corso di estensione anche per il caso ferroviario, per cui si considera l'applicazione in oggetto ancora più rilevante. Nel seguito sono richiamati i principi base delle LLGG.

Le Linee guida illustrano una procedura per la gestione delle attività finalizzate alla sicurezza delle gallerie stradali esistenti al fine di prevenire livelli inadeguati di danno, tali da incidere sulla sicurezza dell'opera e, in senso più generale, dell'intera infrastruttura, rendendo accettabile il rischio.

L'impostazione vuole perseguire una condotta di prevenzione rispetto all'emergere di situazioni potenzialmente pericolose, per programmare l'adozione di interventi di manutenzione preventiva senza incorrere in condizioni di intervento in urgenza.

Quanto riportato nel presente documento è riferito alla adozione di condotte di consapevolezza e prevenzione per l'intero ambito delle gallerie stradali in esercizio, restando inteso che qualora già si riconoscano condizioni che richiedono l'adozione di interventi immediati, il gestore darà corso alla individuazione ed attuazione degli interventi riconosciuti necessari indipendentemente dall'applicazione delle procedure previste dalle Linee guida.

Il documento è composto da tre parti:

- il censimento associato alla valorizzazione delle conoscenze pregresse già disponibili;
- la classificazione preliminare del rischio stimato in modo convenzionale attraverso la definizione di una classe di attenzione;
- la valutazione della sicurezza, di tipo preliminare e accurata, e la sorveglianza e monitoraggio, comprese le tipologie di prove eseguibili.

I programmi delle indagini e degli interventi che si riconoscessero necessari saranno graduati per ciascuna galleria, fornendo criteri di priorità e distinguendo, nell'ambito di una stessa galleria, interventi semplici e di efficacia nel breve termine da quelli più complessi e di attuazione più lontana nel tempo.

Come per le “Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti”, anche per le gallerie la classificazione del rischio o, meglio, la classe di attenzione si inquadra in un approccio generale multilivello che dal censimento delle opere d’arte da analizzare associato al livello di conoscenza, che scaturisce dall’esame preventivo e sintesi di tutte le informazioni già disponibili, perviene alla determinazione di una classe di attenzione sulla base della quale si perverrà, nei casi previsti dalla metodologia stessa, alla valutazione della sicurezza, sia essa limitata ai possibili dissesti di carattere locale o riferita al comportamento globale dell’opera, cui dovrà seguire la programmazione degli interventi e dei piani di sorveglianza che si riconoscessero necessari.

Sono approfondite nel dettaglio le metodologie da adottare per sviluppare l’approccio proposto a livello territoriale, quali il censimento delle opere, la raccolta dei dati già disponibili a partire dai dati di progetto, della realizzazione e della gestione e adozione di interventi di manutenzione già attuati in fase di esercizio.

Seguono le ispezioni iniziali, anche ai fini della redazione delle schede di difettosità dell’opera nonché la valutazione della classe di attenzione in funzione dei possibili rischi rilevanti, strutturale (strutturale “globale” e geotecnico), sismico, idraulico, geologico, stradale, strutturale “locale” e determinati da cause non direttamente strutturali.

Tali rischi, inizialmente analizzati separatamente in termini di pericolosità, vulnerabilità e esposizione, sono poi riuniti in un’unica classificazione generale della classe di attenzione, che è comunque qualificata in relazione alla diffusione nell’ambito dello sviluppo della galleria ed in relazione a particolari rischi, quali l’idraulico ed il geologico, che richiedono una specifica e distinta considerazione negli approfondimenti riconosciuti necessari.

L’indice di diffusione rispetto allo sviluppo totale della galleria descrive in forma sintetica quale sia la tratta di galleria interessata dalla Classe di attenzione più alta attribuita.

La Classe di attenzione così definita individua le condizioni più critiche ai fini della sicurezza presenti lungo la tratta in peggiori condizioni della galleria, diversamente da come desumibile da valutazioni con indici pesati sullo sviluppo della galleria, meno rappresentative di condizioni locali di sicurezza e che forniscono un indice di severità

complessivo dell'intera opera indicativo in genere per previsioni di fabbisogni economici complessivi.

L'articolazione delle linee guida mantiene distinte nelle varie fasi le attività ispettive da quelle di valutazione del livello delle conoscenze e delle valutazioni sullo stato di conservazione delle opere.

Fatta salva la necessaria qualifica degli incaricati delle ispezioni, le valutazioni che prendono in esame lo stato delle conoscenze e gli esiti di ispezioni e di indagini saranno sviluppate in ambito di giudizio esperto, cui potranno concorrere specialisti di più discipline secondo le specifiche tematiche di interesse per ciascuna galleria, con il coordinamento di un responsabile della galleria designato dal gestore.

L'approccio si sviluppa su sei livelli differenti, aventi grado di approfondimento e complessità crescenti. Sinteticamente:

- Il Livello 0 prevede il censimento di tutte le opere e delle loro caratteristiche principali nonché la raccolta delle informazioni e della documentazione disponibili, anche in relazione a rilievi e prove già effettuati, con giudizio esperto sul grado delle conoscenze disponibili e individuazione preliminare degli indicatori di pericolosità di maggiore interesse per ciascuna galleria;

- Il Livello 1, esteso alle opere censite a Livello 0, prevede l'esecuzione di ispezioni iniziali della struttura, rivestimento ed altri elementi di rilevanza strutturale e non strutturale, e delle caratteristiche geomorfologiche, idrogeologiche ed idrauliche dell'area, tese a individuare lo stato di conservazione e le principali caratteristiche strutturali e geometriche di tutte le opere, nonché potenziali condizioni di rischio associate all'interazione con le formazioni naturali che ospitano la galleria, secondo le caratteristiche geotecniche/geomeccaniche e l'assetto del contesto geologico. Le ispezioni iniziali saranno condotte a partire dal quadro di conoscenze già disponibili, eventualmente integrate con specifiche indagini, come ricostruito nell'ambito del Livello 0;

- Il Livello 2 consente di giungere alla classe di attenzione di ogni galleria, sulla base dei parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, determinati elaborando i risultati ottenuti dai livelli precedenti. In funzione di tale classificazione, si procede quindi con uno dei livelli successivi. La Classe di attenzione è qualificata secondo un indice di diffusione, espresso quale percentuale della lunghezza della

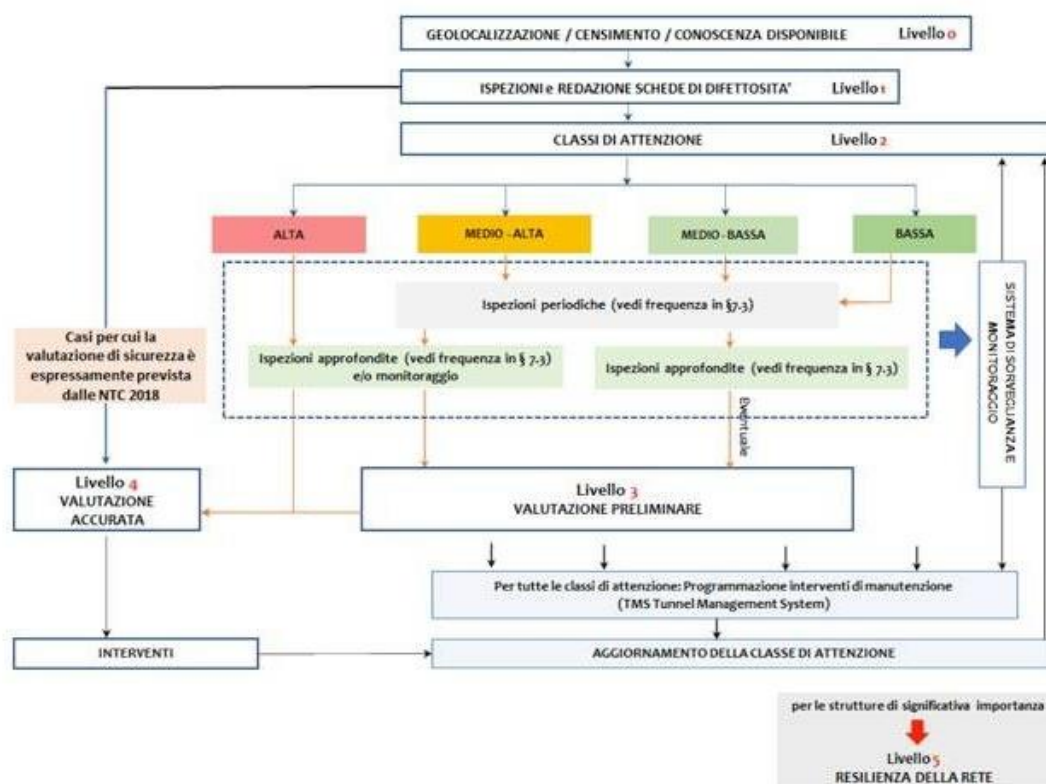
galleria caratterizzata dalla classe attribuita. Vengono altresì riportati quali caratteri qualificanti i fattori di pericolo che determinano la classe di attenzione sia riferiti alla struttura di galleria, sia riferiti a fattori esterni all'ambiente galleria in senso stretto, quali le classi associate ai rischi geologico geotecnico lungo la galleria ed agli imbocchi e al rischio idrologico idraulico;

- Il Livello 3 prevede l'esecuzione di valutazioni preliminari atte a comprendere, unitamente all'analisi della tipologia ed entità dei dissesti rilevati nelle ispezioni eseguite al Livello 1, il livello di sicurezza nei confronti dei possibili dissesti locali che interessano il rivestimento, più o meno diffusi nella galleria, e dei dissesti correlati all'interazione del rivestimento con le formazioni naturali attraversate. Quando ne ricorrano le condizioni, vengono sviluppate specifiche valutazioni per le possibili interazioni con instabilità di insieme delle formazioni naturali attraversate o in corrispondenza degli imbocchi, nonché delle condizioni di salvaguardia idraulica;

- Il Livello 4 prevede l'esecuzione di valutazioni accurate della sicurezza della galleria nei confronti delle azioni agenti e di fattori esterni all'ambiente galleria in senso stretto, tenendo in debito conto quanto indicato dalle Norme Tecniche per le Costruzioni vigenti;

- Il Livello 5, non trattato esplicitamente nelle presenti Linee Guida, si applica a gallerie considerate di significativa importanza all'interno della rete. Per tali opere è utile svolgere analisi più sofisticate quali quelle di resilienza, valutando la rilevanza trasportistica, analizzando l'interazione tra la struttura e la rete stradale di appartenenza e le conseguenze di una possibile interruzione dell'esercizio della galleria sul contesto socioeconomico in cui essa è inserita.

Dal Livello 0 al Livello 5, la complessità, il livello di dettaglio e l'onerosità delle indagini e delle analisi aumentano, ma il numero di infrastrutture su cui applicarle, così come il livello di incertezza dei risultati ottenuti, si riduce. Il flusso logico che complessivamente definisce le relazioni tra un livello e l'altro è mostrato in Figura 3-4.



**Figura 3-4: Approccio multilivello e relazioni tra i livelli di analisi (LLGG Classificazione del Rischio delle Gallerie, 2022)**

Come si evince dalla Figura 3-4, il fulcro centrale dell'approccio, sui cui risultati si basano le valutazioni successive, è il Livello 2, ossia la definizione delle classi di attenzione.

Come esposto nel documento, essa consiste nel determinare, per ogni galleria, una Classe di Attenzione (CdA), funzione di fattori di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione, e classificata in alta, medio-alta, medio-bassa e bassa, riferita alla tratta nelle peggiori condizioni e qualificata secondo le specifiche tipologie di potenziale pericolo. Ad ogni classe di attenzione corrispondono determinate conseguenti azioni, in termini di indagini/monitoraggio/verifiche, graduate in relazione all'indice di diffusione e agli eventuali caratteri speciali. In particolare:

- Per le gallerie con classe di attenzione Alta è previsto l'immediato avvio di valutazioni accurate, sia in termini di valutazioni di sicurezza sia di approfondimenti sulle caratteristiche idrauliche, geologiche, geotecniche e/o strutturali, stradali, laddove necessario, in relazione in particolare alla Classe di attenzione ed alla specifica tipologia di potenziale rischio che ha concorso alla sua

attribuzione. Le ipotesi, i criteri e le modalità di esecuzione delle valutazioni accurate, previste dal Livello 4 dell'approccio multilivello, sono discusse nel § 5. Per le gallerie di Classe di Attenzione Alta è prevista l'esecuzione delle ispezioni approfondite con le modalità e frequenza di cui al § 7.3 e con eventuale installazione di sistemi di monitoraggio come descritto nel § 6;

- Per le gallerie con classe di attenzione Medio-Alta è prevista l'esecuzione di ispezioni ordinarie e approfondite con le modalità e frequenze di cui al § 7.3 con esecuzione di indagini specialistiche e, ove si rendesse necessario, l'installazione di sistemi di monitoraggio come descritto nel § 6. Sulla base delle ispezioni è previsto l'impiego di valutazioni preliminari di Livello 3 e qualora necessaria, l'esecuzione della valutazione approfondita secondo le modalità discusse nel § 5;

- Per le gallerie in CdA Medio-Bassa e Bassa è prevista l'esecuzione di ispezioni periodiche (si veda al proposito la parte ad esso dedicata nelle presenti linee guida). Sono comunque da prevedere ispezioni approfondite ad intervalli regolari, secondo le frequenze indicate nel § 7.3, valutando la conferma della Classe di attenzione e la necessità di dare corso a valutazioni preliminari della sicurezza. Le ispezioni periodiche ordinarie e periodiche indipendenti saranno graduate secondo frequenze rapportate alla Classe di attenzione attribuita alla singola galleria.

Nel seguente lavoro, si illustrano strumenti innovativi e metodologie per applicare tale approccio per raggiungere in modo speditivo valutazioni fino al secondo livello e impostare un sistema oggettivo e affidabile per le analisi di livello successivo.

### 3.2.2 *Versanti e Scarpate*

I riferimenti principali per la definizione rischio-specifico di versanti e scarpate, ove disponibili, sono i piani di governo del territorio, quali Autorità di Bacino/Distretto, Piani Regolatori, Piani Urbani, etc.

Nel seguente lavoro, si illustrano strumenti innovativi e metodologia per contestualizzare gli strumenti di governo del territorio lungo l'infrastruttura con un dettaglio elevato di analisi che permette di entrare nella fase di progettazione delle strategie e degli interventi.

### 3.2.3 *Cenni a impatti non analizzati*

Gli hazard e i possibili shocks a cui può essere sottoposta la linea sono di varia natura, quali esondazioni, desertificazione non indotte da cambiamento climatico, oltre ai parametri esogeni al sistema alla scala del territorio nazionale, quali terremoti, guerre, gestione delle risorse, immigrazione.

## 3.3 **Metodologia e tecnologie innovative**

Nel seguente lavoro, si illustrano strumenti innovativi e metodologie per applicare tale approccio per raggiungere in modo speditivo valutazioni di dettaglio (secondo livello per le gallerie; progettazione per i versanti e le scarpate) e impostare un sistema oggettivo e affidabile per le analisi di livello successivo.

### 3.3.1 *MIRET*

Quanto esposto nel 3.1, è connotato in carattere pratica attraverso la metodologia MIRET (Foria, 2019; Foria, 2021; Foria, 2022) presentata nell'ambito di questo lavoro. La metodologia è stata concepita per le gallerie, ma i suoi principi si estendono anche ad altri elementi dell'infrastruttura e del territorio. 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 sistema 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. Le milestones sono:

- Rilievo e Ispezione (S);
- Analisi dei difetti/rischio (DA);
- Digitalizzazione (DI);
- Pianificazione e Progettazione (PD);
- Lavori e Manutenzione (WM);
- Monitoraggio (MO).



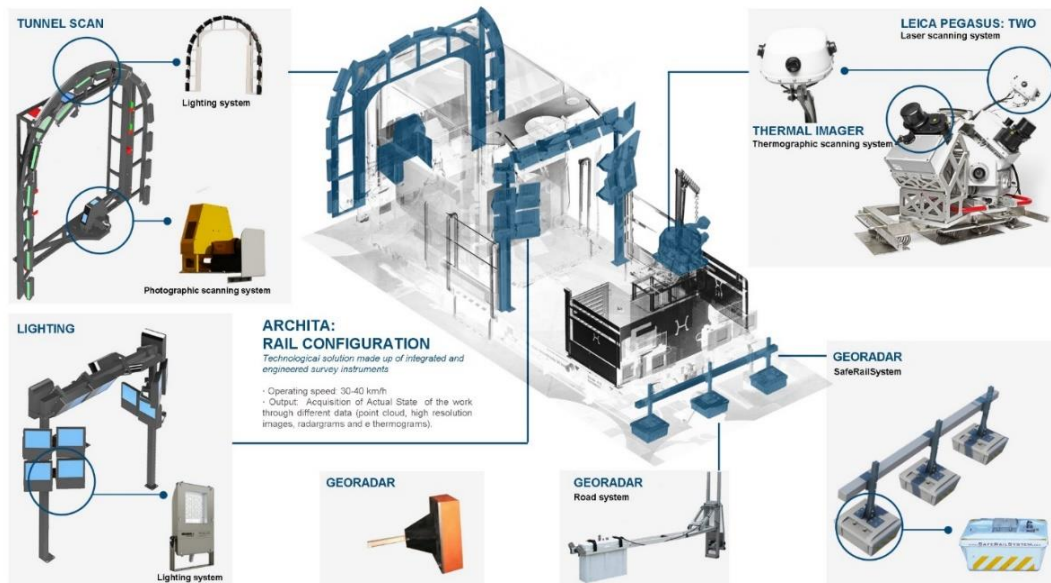
**Figura 3-5: Puzzle-chart della metodologia e delle milestones del MIRET (Foria, 2021).**

L'attuale sistema di sorveglianza delle infrastrutture 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 rilevamento e l'ispezione di infrastrutture 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.

ARCHITA (Foria, 2019) 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: laser scanner, georadar, termocamere e fotografie ad alta definizione. L'acquisizione dei dati avviene con limitato disturbo della circolazione del traffico, in quanto il sistema permette di rilevare l'intera infrastruttura, e le opere al contorno (comprese le unità geomorfologiche di

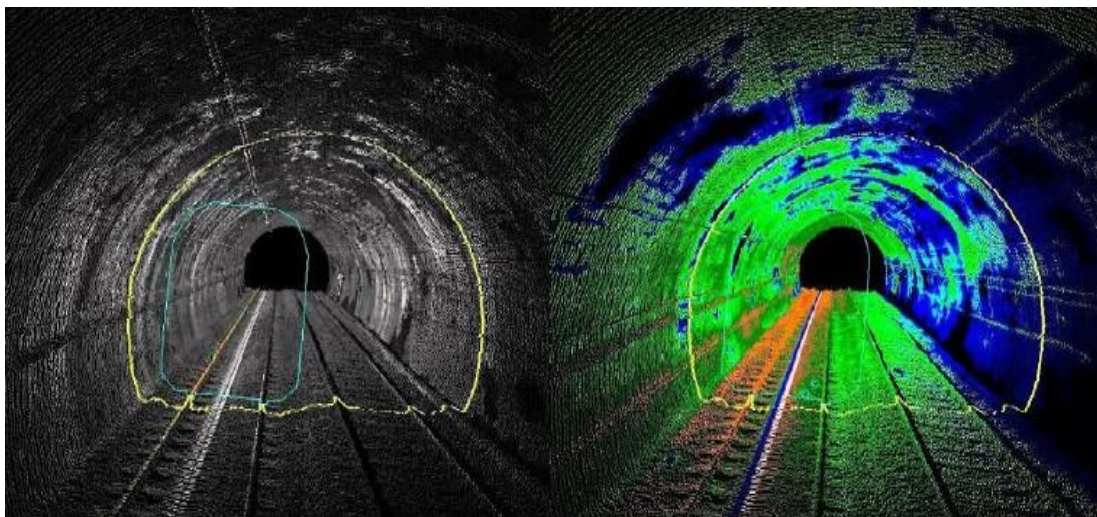
Versanti/Scarpate) a velocità sostenuta (i.e. 15-30 km/h) con un unico passaggio o un numero ridotto di passaggi.



**Figura 3-6: Sistema ARCHITA (Foria, 2019).**

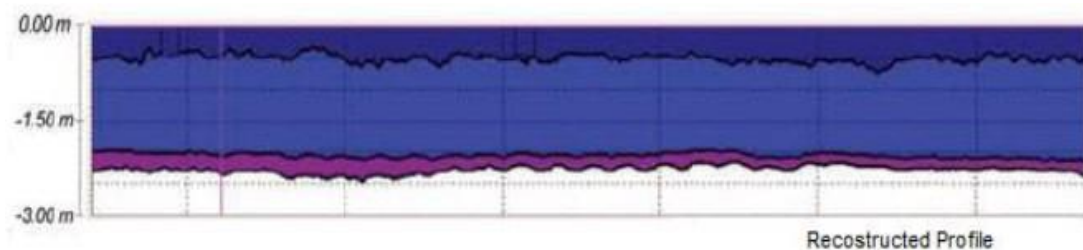
Gli strumenti installati cambiano nel corso degli anni per l'aggiornamento tecnologico e in funzione delle configurazioni specifiche che dipendono dalle finalità del lavoro da svolgere. Nel dettaglio, gli strumenti di rilevamento installati su Archita per la maggior parte dei lavori qui presentati sono:

- Laser Scanner (Leica Pegasus:Two): nella configurazione di n.8 camere digitali, n.1 piattaforma inerziale IMU, n.2 profiler Z+F 9012, n.2 antenne GPS, n.1 odometro ottico e n.4 termocamere. Tale strumentazione permette di ottenere una nuvola di punti 3D georeferenziata per una completa e precisa ricostruzione delle opere rilevate. A partire dalla nuvola di punti infatti è possibile ricavare le informazioni di natura geometrica dell'infrastruttura e delle relative componenti e creare un modello digitale dell'infrastruttura. Attraverso software specifici è possibile eseguire analisi di dettaglio tra cui l'analisi di transitabilità per le sagome limite in ambito ferroviario (clearance analysis). Le immagini termiche possono essere integrate alla nuvola di punti per fornire una rappresentazione dei gradienti di temperatura riscontrati all'intradosso del rivestimento della galleria utili per la valutazione dello stato di conservazione dell'infrastruttura.



**Figura 3-7: Nuvola di punti da ARCHITA.**

- Ground Penetrating Radar (I.D.S. GeoRadar) nella configurazione di n.1 antenna radar con frequenza centrale 600 MHz. Questo strumento permette di eseguire un'indagine non distruttiva del rivestimento delle gallerie (o di qualsiasi altro elemento con sviluppo in profondità tra 1 e 1,5 m) al fine di ottenere informazioni sugli spessori e sulla presenza di eventuali vuoti a tergo del rivestimento.



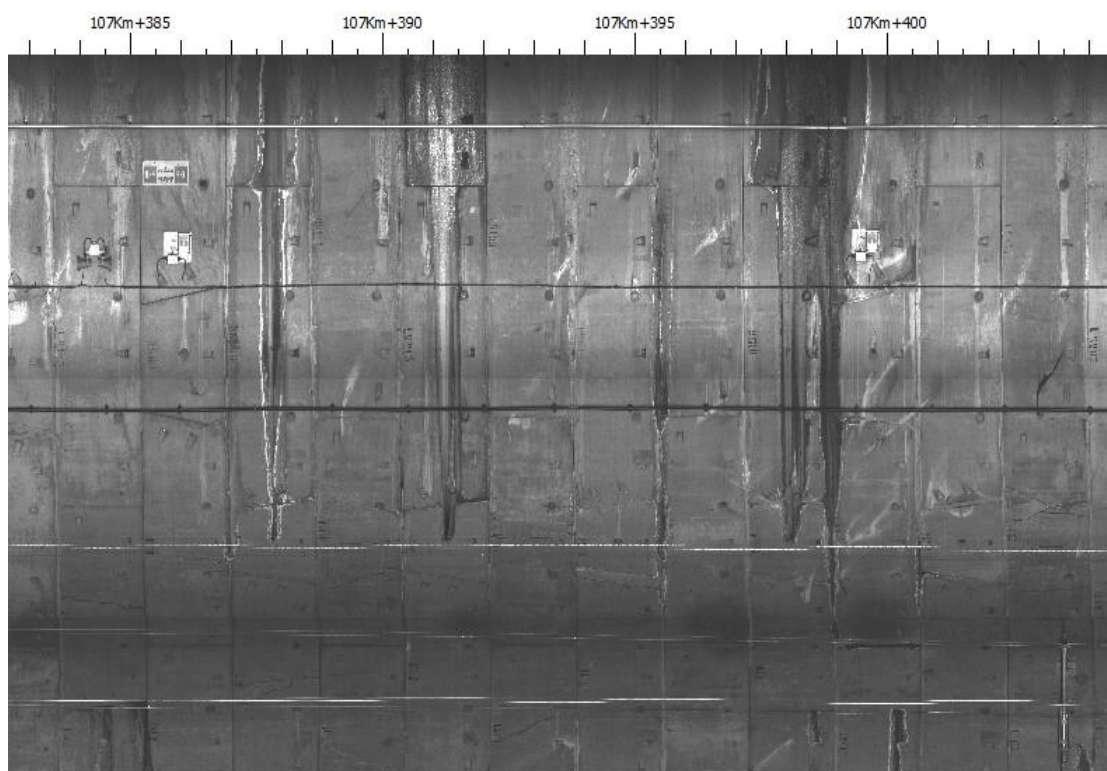
**Figura 3-8: Indagine georadar per la ricostruzione degli spessori strutturali. In particolare in figura è rappresentate il tipico output di elaborazione del radagramma estratto da ARCHITA.**

- Ground Penetrating Radar (I.D.S. GeoRadar) nella configurazione di n.3 antenne radar (SRS SafeRailSystem) con frequenza centrale 40 MHz. Il sistema SRS, utilizzato in modalità RAIL, consente di rilevare gli spessori e lo stato di conservazione del ballast ferroviario attraverso l'individuazione di eventuali vuoti o zone di depressione.

- Ground Penetrating Radar (I.D.S. GeoRadar) nella configurazione di n.1 antenna radar (Hi Pave System) con frequenza centrale 2 GHz e n.1 antenna radar (Hi Pave System) con frequenza centrale 400/900 MHz. Il sistema Hi Pave, utilizzato

in modalità ROAD, consente di rilevare gli spessori degli strati che compongono la pavimentazione stradale ed individuare la presenza di eventuali cavità.

- Immagini ad alta definizione con sistema Tunnel Scan (ADTS e customizzato per ETS su ARCHITA) nella configurazione di n.3 camere lineari ad alta risoluzione, n.1 profiler Z+F 9012 e sistema di illuminazione composto da n.16 luci LED ad alta efficienza disposti a raggiera ed allineati con le camere. Tale dispositivo viene utilizzato per analizzare lo stato di conservazione del rivestimento delle gallerie. Le immagini rilevate, post-processate con specifici software, restituiscono un campo visivo di circa 210° con la possibilità di ispezionare elementi fino ad una distanza di 10m dal punto di ripresa con una risoluzione longitudinale e trasversale millimetrica.



***Figura 3-9: Esempio di immagine HD del rivestimento della galleria visualizzata con il software di analisi.***

L'analisi dei diversi input di ARCHITA avviene grazie a MIRET in specifici ambienti software che mirano ad integrare il più possibile le informazioni del modello della gallerie e.g. le immagini HD e le immagini termiche. A partire da questi modelli, MIRET impiega analisi multicriterio spaziale a supporto delle decisioni (Spatial Multi Criteria Decision Analysis, SMCDA) (Spackman, 2009) ogni qual volta bisogna combinare parametri, qualitativi e quantitativi, per sintetizzare complessi set di

informazioni e ottenere la valutazione della Priorita/CdA secondo le LLGG. Con l'impiego di strumenti spaziali, i criteri possono essere rappresentati attraverso primitive geometriche (punto, linea, arco, raster) a cui sono associati i valori dei criteri di valutazione, memorizzati come attributi alfanumerici. L'analisi multicriterio per scopo decisionale è una disciplina orientata a supportare il decisore qualora si trovi a operare con valutazioni numerose e conflittuali, consentendo di ottenere una soluzione di compromesso in modo trasparente. I metodi di analisi multicriterio supportano il decisore nella fase di organizzazione e sintesi di informazioni complesse e spesso di natura eterogenea.

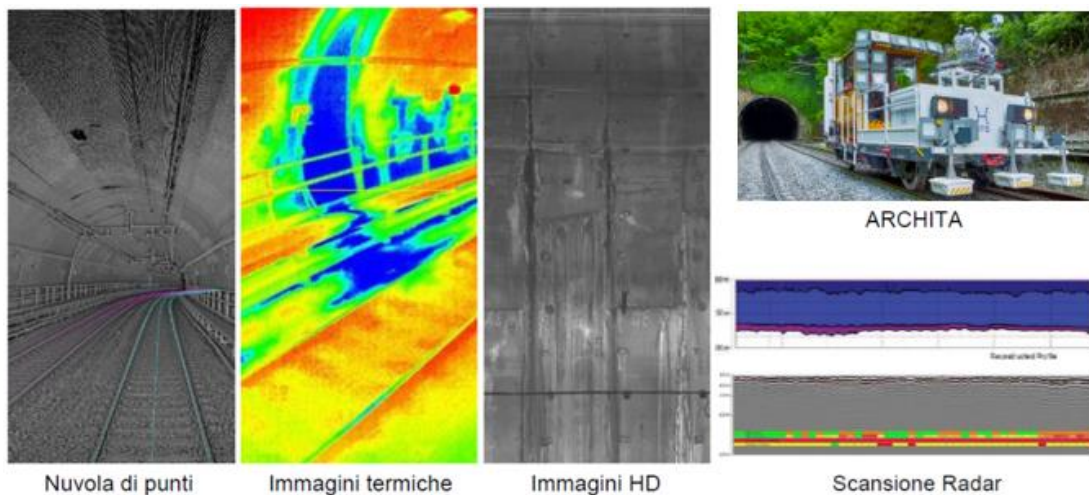
Tale metodologia permette al decisore di analizzare e valutare diverse alternative, monitorandone l'impatto sui differenti attori del processo decisionale. Esistono vari metodi per l'analisi multicriterio (Spackman, 2009) e la SMCDA viene ormai utilizzata in vari campi applicativi (e.g. costruzioni, finanza, pianificazione, ecologia). In linea di massima, la SMCDA viene utilizzata in tutti quei domini in cui non è possibile applicare direttamente un metodo di ottimizzazione, essendo presenti numerosi criteri di decisione.

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 infrastruttura. L'intervento contribuisce al sistema Infrastruttura, 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.

Collante di tutte le milestone è un efficace sistema di Monitoraggio (MO). Esso fornisce una risorsa continua 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 milestones permette di poter 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).

### 3.3.2 Gallerie

Grazie ad ARCHITA e MIRET, la ricostruzione di geometria e stato di consistenza delle gallerie e dell'infrastruttura 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 e di qualsiasi sistema di sorveglianza delle Opere d'Arte, in quanto ripetibile con ciclicità, o in fase di post-operam, per raccogliere e analizzare i dati in diversi istanti temporali. Questa operazione è particolarmente rilevante anche ogni volta che ci sono delle modifiche all'interno della galleria o sull'infrastruttura i.e. manutenzione straordinaria, potenziamento della linea, aggiornamento normativi. 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.

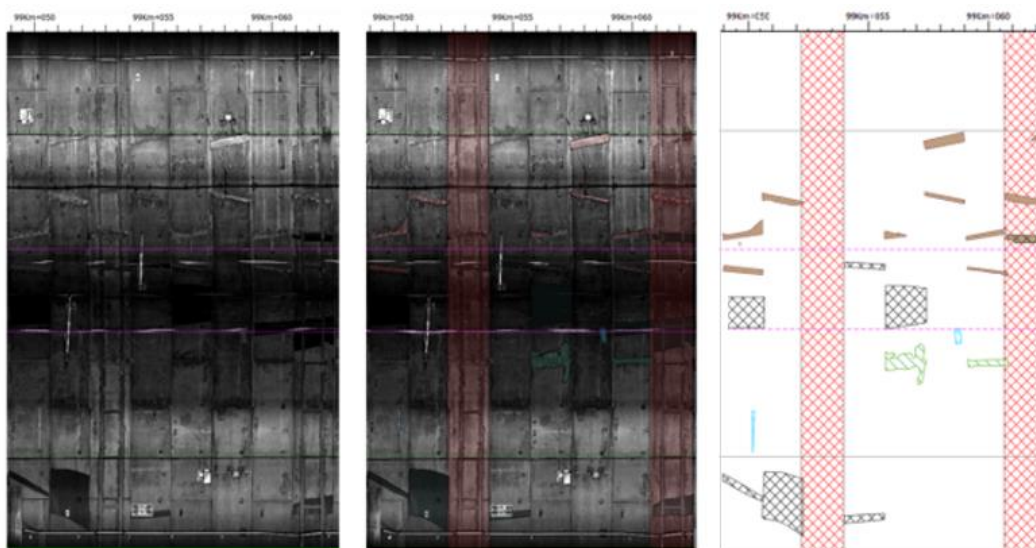


**Figura 3-10: Acquisizione con sistema ARCHITA (Foria, 2019; Foria, 2021).**

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 infrastruttura 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 secondo la SMCDA. Al giorno d'oggi c'è una grande varietà di cataloghi e metodi tra i Committenti, nonostante i recenti sforzi normativi (e.g. LLGG Classificazione Rischio delle Gallerie). 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 adottate 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 3-11), pronti per essere integrati nelle fasi successive.



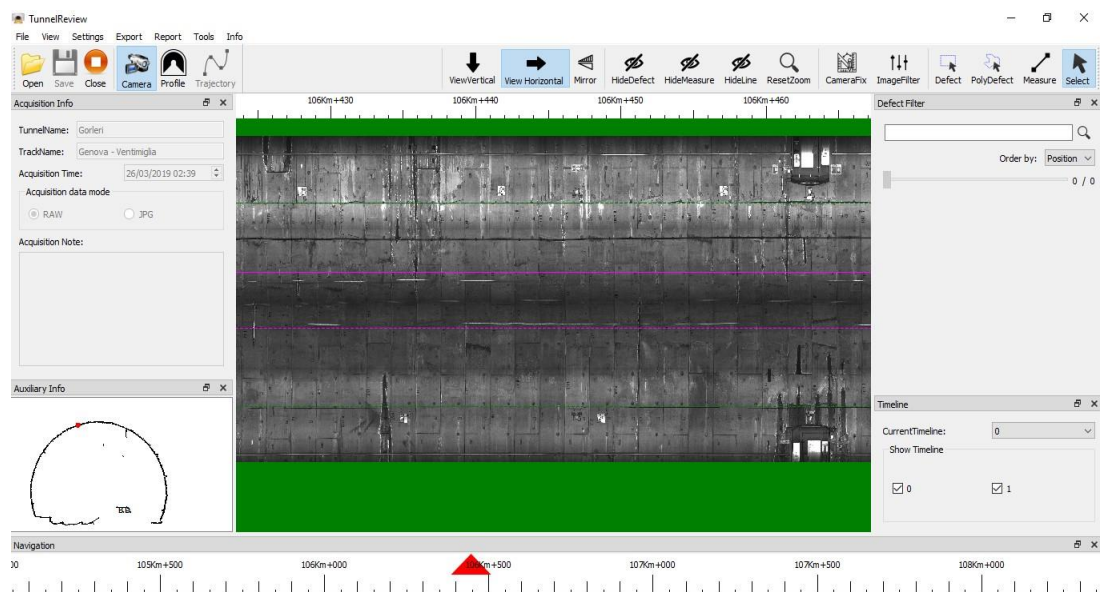
**Figura 3-11: Processo di analisi dei difetti e relativo output grafico di un settore della infrastruttura (Foria, 2021).**

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 infrastruttura, sia per settori della stessa.

L'acquisizione delle immagini fotografiche e dei dati georeferenziati per mezzo dei dispositivi installati su ARCHITA permette l'impiego di opportune tecniche di post-processing per ottenere un numero consistente di informazioni rappresentative dello stato di fatto delle opere (Figura 3-12).

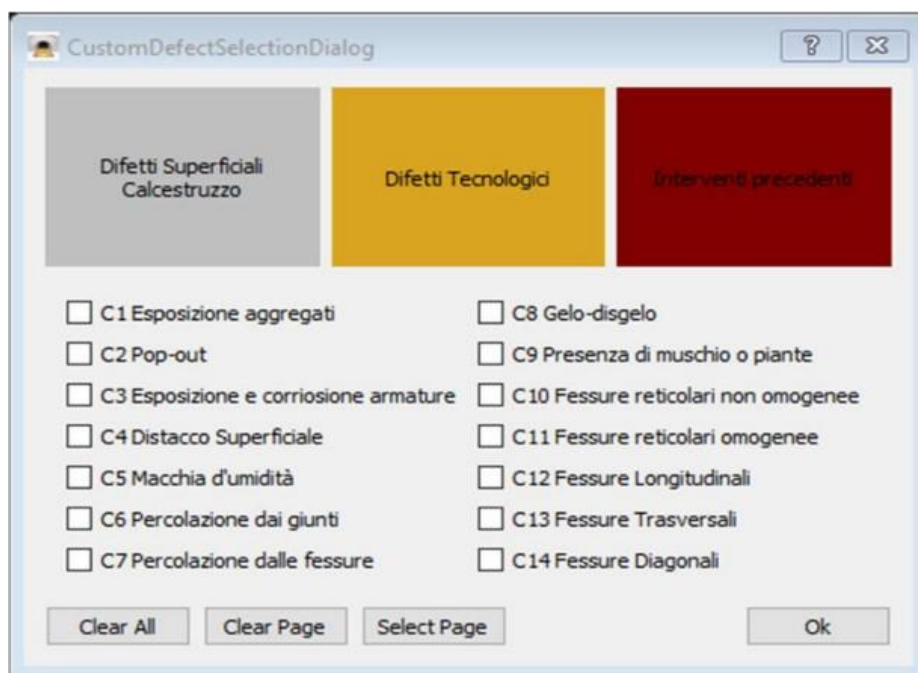
In particolare, grazie allo specifico ambiente software prodotto da ETS Srl in collaborazione con l'azienda ADTS Srl, è stato possibile associare alle immagini fotografiche ad alta risoluzione, acquisite con le tre fotocamere lineari montate su ARCHITA, la geometria della galleria rilevata per mezzo del laser scanner al fine di rendere le immagini misurabili. L'output di questa operazione, che viene visualizzato mediante il software, è una rappresentazione fotografica piana e rettilinea del

rivestimento della galleria con una risoluzione longitudinale e trasversale di 1 mm che consente di digitalizzare i difetti di tipo lineare e areale individuati sull'infrastruttura.



**Figura 3-12: Schermata iniziale del software.**

La fase preliminare alla diagnostica delle difettosità nel tunnel è la definizione e l'implementazione nel software di un catalogo dei difetti. L'importanza di creare un catalogo delle difettosità specifico per le infrastrutture sotterranee è quella di permettere all'operatore un più facile ed oggettivo processo di riconoscimento e classificazione dei fenomeni di degrado tipici delle gallerie (Figura 3-13).



**Figura 3-13: Finestra catalogo difetti implementato nel software.**

Ad esempio, nel seguito si mostra un catalogo difetti creato da ETS relativamente alle gallerie realizzate con tecnica di scavo meccanizzato, che si presenta strutturato nelle tre seguenti macro-categorie:

- Difetti superficiali del calcestruzzo (C): riguardano tutti i difetti visibili sulla superficie del rivestimento indipendentemente dalla struttura ma peculiari del materiale.

- Esposizione aggregati (C1);
- Pop-out (C2);
- Esposizione e corrosione armature (C3);
- Distacco superficiale (C4);
- Macchia di umidità (C5);
- Percolazione dai giunti (C6);
- Percolazione dalle fessure (C7);
- Gelo-disgelo (C8);
- Presenza di muschio e piante (C9);
- Fessure reticolari non omogenee (C10);
- Fessure reticolari omogenee (C11);
- Fessure longitudinali (C12);
- Fessure trasversali (C13);
- Fessure diagonali (C14);

- Difetti tecnologici (T): riguardano i difetti propri dei tunnel realizzati con tecnica di scavo in meccanizzato quali fessure nelle parti tipiche dei conci come giunti, iniettori e connettori, sbeccature d'angolo, sfalsamento degli anelli, etc.

- Fessure longitudinali (T12);
- Fessure trasversali (T13);
- Fessure d'angolo (T14);
- Sbeccature (T15);
- Inserti danneggiati (T16);
- Sfalsamento tra anelli (T17);

- Interventi precedenti (I): riguardano i vari interventi di manutenzione effettuati in fasi precedenti quali iniezioni, sigillature, centinature, etc.

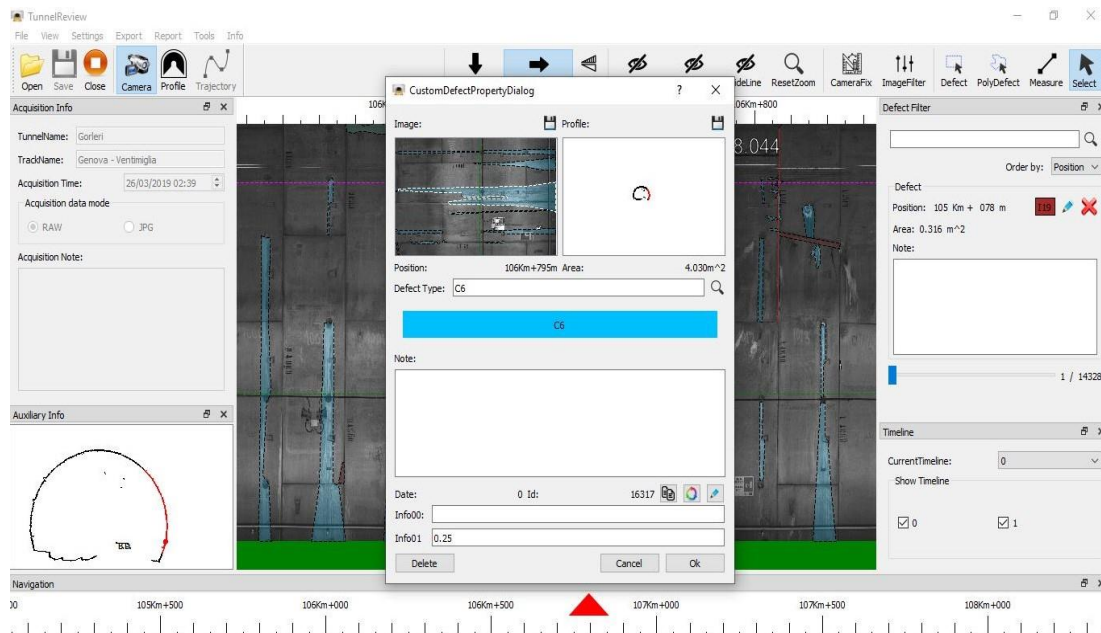
- Interventi precedenti strutturali lineari (I18);

- Interventi precedenti strutturali areali (I19);
- Interventi precedenti superficiali lineari (I20); – Interventi precedenti superficiali areali (I21).

Il catalogo difetti illustrato si basa su un'operazione di raccolta dei cataloghi difetti dei principali Gestori di infrastrutture di trasporto in Italia. Questo documento pone particolare attenzione ai difetti legati alle caratteristiche intrinseche del processo di costruzione e del materiale adottato (categoria T) ed introduce contestualmente la categoria relativa agli interventi precedenti (I). Infatti un intervento di manutenzione, seppur consente di ripristinare un difetto segnalato in altre ispezioni, allo stesso tempo costituisce un elemento che può essere soggetto a fenomeni di degrado e che deve essere monitorato nel tempo.

Attraverso l'utilizzo del software è possibile quindi digitalizzare la geometria dei diversi tipi di difetti che si individuano sul rivestimento, assegnargli la specifica categoria ed attribuirgli le informazioni legate alla loro intensità da catalogo come per esempio l'apertura di una fessura, la gravità di una percolazione, etc.

Allo stesso tempo, il programma assegna a ciascun difetto digitalizzato un codice ID, la progressiva chilometrica della sua posizione ed un'indicazione rispetto alla timeline nella quale è stato digitalizzato (Figura 3-14).



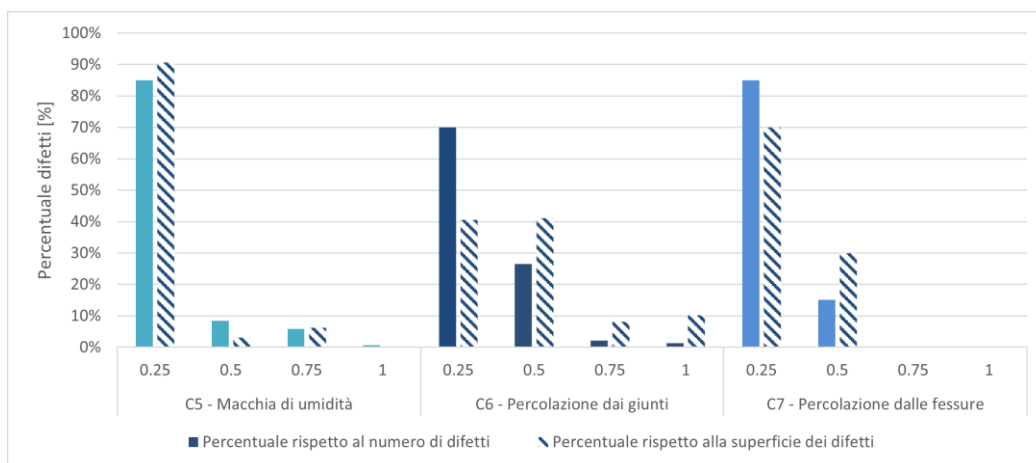
**Figura 3-14: Esempio di digitalizzazione di un difetto nel software.**

Il software permette di mappare i difetti di due ispezioni differenti della stessa galleria all'interno di un unico file. Le digitalizzazioni vengono salvate su due timeline differenti, che possono essere attivate o spente a discrezione dell'utente, permettendo di eseguire analisi temporali dello stato di evoluzione delle difettosità presenti nel tunnel attraverso il confronto dei singoli difetti rilevati.

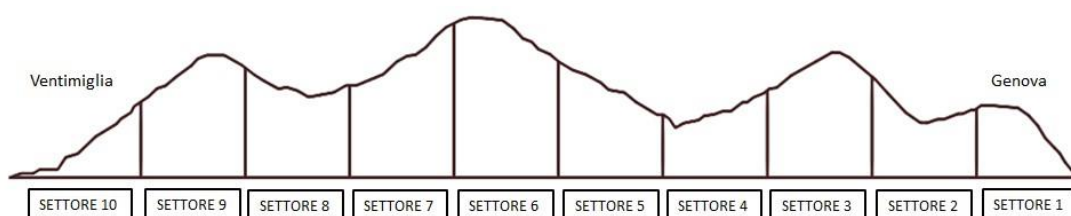
Al termine della fase di analisi e digitalizzazione manuale dei difetti è possibile esportare le informazioni geometriche e non geometriche degli ammaloramenti digitalizzati in formato .dxf e .xlsx. L'export in formato .xlsx rappresenta un report nel quale viene riportato l'elenco completo delle difettosità riscontrate lungo la galleria. Per ognuno di essi viene indicata l'ubicazione in termini di progressiva chilometrica e di posizione nella sezione, la categoria, l'estensione, l'intensità, il codice ID e la relativa timeline. L'export in formato .dxf permette invece di visualizzare una mappatura schematica dei difetti in ambiente CAD, utile a comprendere la distribuzione planimetrica dei difetti presenti sulla superficie cilindrica del rivestimento della galleria sviluppata su un piano. Ogni tipologia di difetto è esportata in automatico con un layer dedicato relativamente al catalogo difetti utilizzato.

La capacità del software di esportare le informazioni legate alla diagnostica in questi formati risulta fondamentale per eseguire analisi e produrre elaborati tecnici.

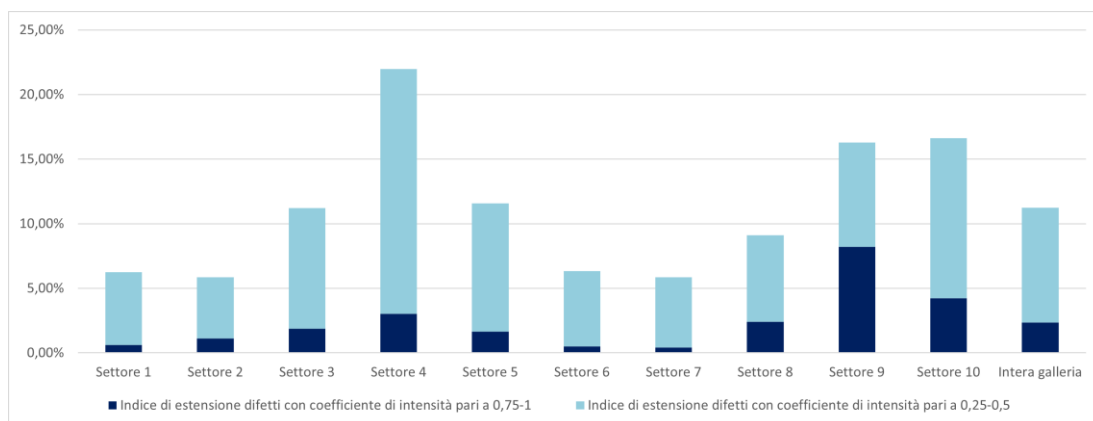
Nell'esempio in Figura 3-17 e Figura 3-18, l'operazione di digitalizzazione manuale dei difetti ha evidenziato la presenza sul rivestimento della galleria di circa 9.000 ammaloramenti legati all'acqua (C5, C6, C7 del catalogo) a cui corrispondono circa 7.300 m<sup>2</sup> di superficie di rivestimento. Di questi difetti il 97 % costituisce segni di percolazione dai giunti mentre la rimanente parte è ripartita in quantità uguali tra macchie d'umidità e percolazioni da fessure. Come si può osservare dall'istogramma, la maggior parte dei difetti rilevati rappresenta difettosità di piccole dimensioni con coefficiente di intensità basso (0.25-0.5), cioè segni di percolazioni e umidità con modesto deposito di sali e cloruri. Una più piccola percentuale invece riguarda superfici bagnate e grondanti (0.75-1) (Figura 3-17).



**Figura 3-15: Istogramma del numero e dell'estensione dei difetti legati all'acqua divisi per tipologia e per coefficiente di intensità.**



**Figura 3-16: Ricostruzione del profilo della galleria con i settori di analisi. Nell'esempio, In particolare, avendo la galleria una lunghezza di 3.076 metri (imbocchi esclusi), considerando di percorrerla nella direzione della progressiva chilometrica, sono stati definiti 9 settori di estensione pari a 300 metri ed il decimo di lunghezza pari ai rimanenti 376 metri.**

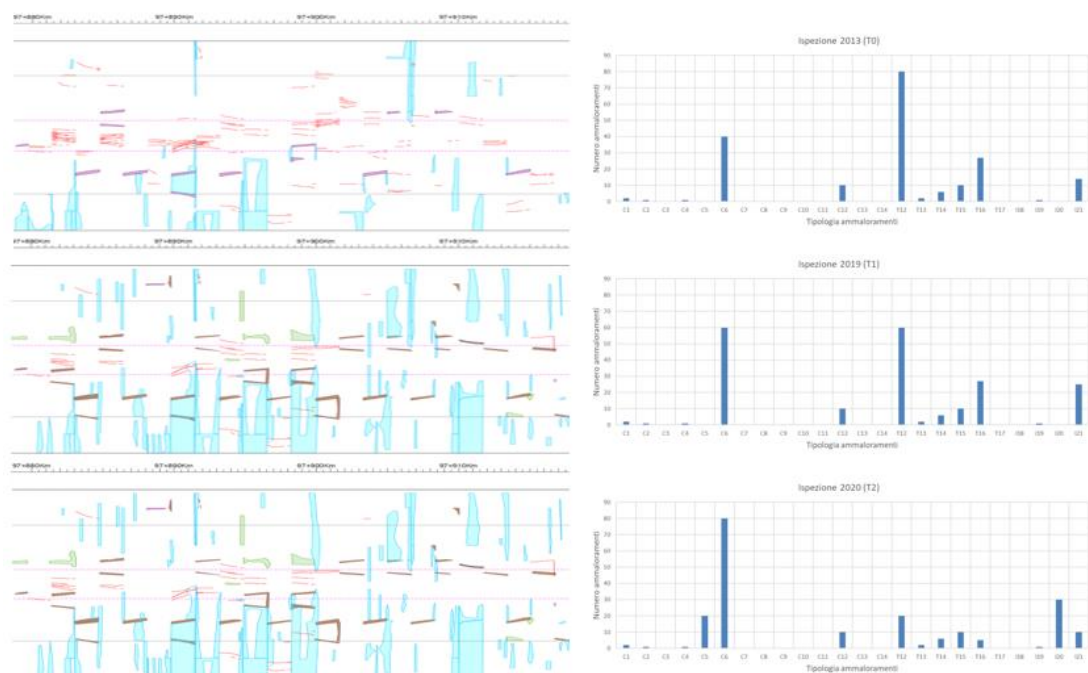


**Figura 3-17: Istogramma dell'indice di estensione dei difetti legati all'acqua (C5, C6 e C7). Si riportano i risultati del calcolo dell'indice di estensione dei difetti, in particolare si evidenziano i difetti classificati con alta intensità (0.75-1).**

Al fine di analizzare lo stato di conservazione della galleria in modo più dettagliato l'infrastruttura può essere suddivisa in settori (Figura 3-16) di uguale lunghezza e per ognuno di essi può essere determinato l'indice di estensione dei difetti. Per ognuno dei settori definiti si può quindi determinare l'indice di estensione dei difetti per i settori e per l'intera galleria mettendo in evidenza la quota rispetto alla superficie totale di rivestimento.

Con le tradizionali tecnologie, un'analisi come mostrata nel breve esempio sopramenzionato avrebbe richiesto un tempo di rilievo, digitalizzazione ed elaborazione di settimane/mesi, a differenza della durata in giorni/settimana grazie all'impiego di ARCHITA e MIRET. Inoltre, in quest'ultimo caso, abbiamo anche un modello completamente digitalizzato della galleria e del processo ispettivo.

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



**Figura 3-18: Confronto del numero di ammaloramenti, di un settore della infrastruttura, delle ispezioni effettuate (Foria, 2021).**

Il processo diagnostico diventa così ripetibile e automatizzabile. ETS ha scelto di investire nello sviluppo di algoritmi di Intelligenza Artificiale (IA) per il rilevamento

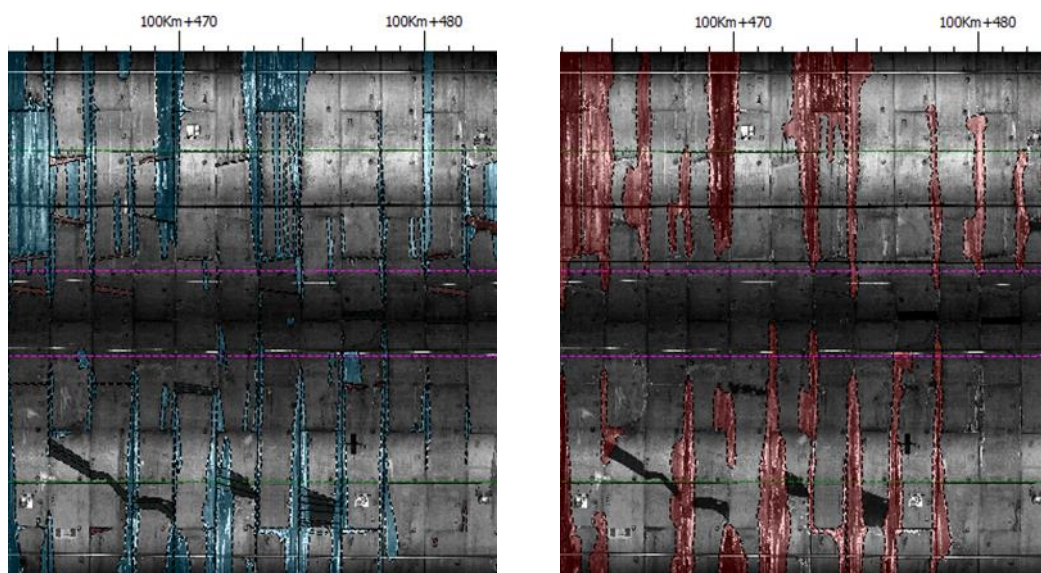
dei difetti (Foria, 2021; Foria, 2022). Ad oggi, tale algoritmo è in grado di rilevare e segmentare i difetti legati alla presenza di acqua, di fessure e di distacchi nelle infrastrutture scavate in meccanizzato con rivestimento in conci prefabbricati.

Lo sviluppo parte dall'implementazione *Crack SegNet*, con una Rete Neurale Convoluzionale (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 100-1000 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 infrastruttura.

La Figura 3-19 mostra il rilevamento manuale dei difetti dovuti alla presenza di acqua, mentre a destra il rilevamento per la stessa tipologia di difetto è stata condotta con l'utilizzo dell'Intelligenza Artificiale.

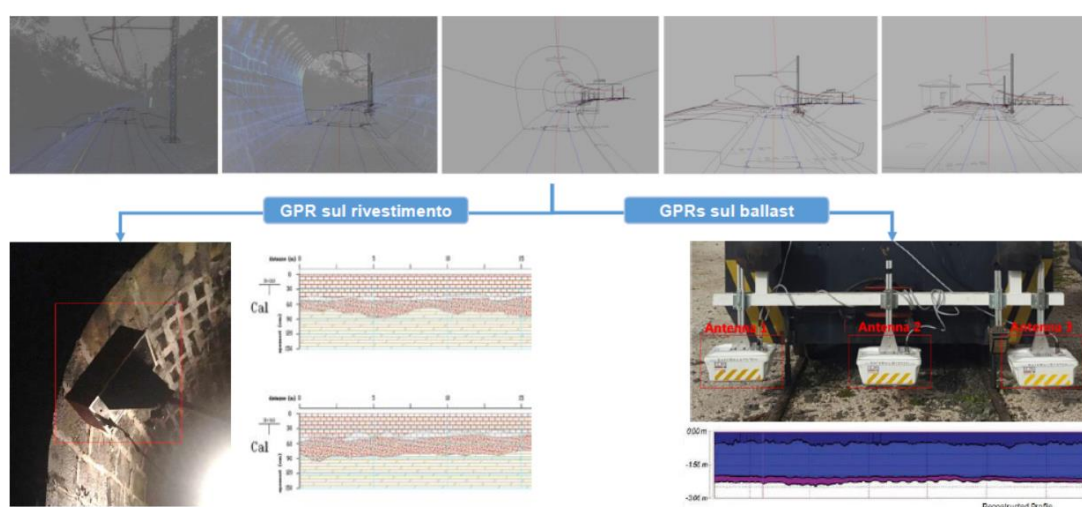


**Figura 3-19: Rilevamento manuale (a sinistra) vs. rilevamento con l'utilizzo dell'AI (a destra) (Foria, 2020).**

Per Digitalizzazione 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 infrastruttura e associare le relative informazioni per impostare il gemello digitale in BIM (Foria, 2019; Foria, 2021), con le caratteristiche fisiche e funzionali dell'opera<sup>6</sup>. 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.

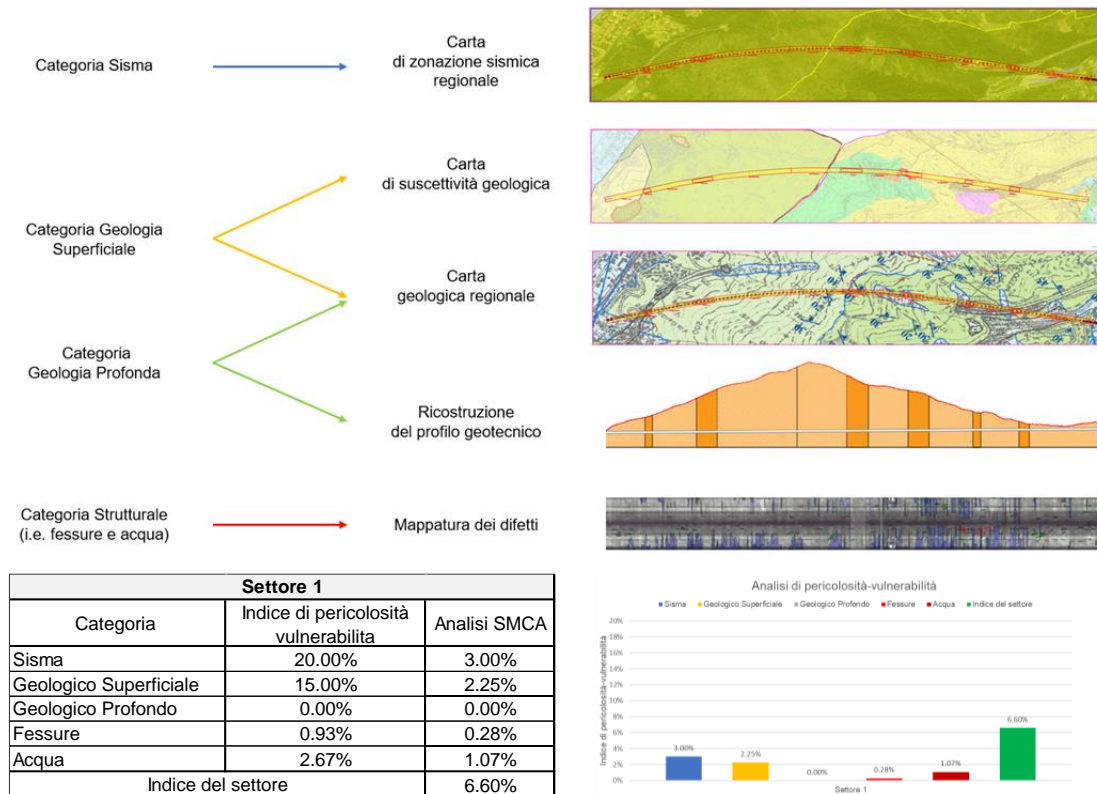
La ricostruzione geometrica è utilizzata come strumento di supporto alle milestones della metodologia MIRET, ma anche come strumento di verifica a sé stante (i.e. verifiche di transitabilità per le sagome limite in ambito ferroviario).



**Figura 3-20: Ricostruzione 3D da dati acquisiti (Foria, 2021).**

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 ad opera dei Committenti in un ambiente informatizzato<sup>6</sup>.

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<sup>7</sup>. Successivamente gli indici di Priorità vengono combinati tra loro attraverso un'Analisi Multicriteria Spaziale (SMCA) per combinare i fattori di pericolosità e vulnerabilità dell'opera (Figura 3-21), estendendo quanto trattato nelle LLGG. L'obiettivo finale è la gestione e l'identificazione del rischio per le infrastrutture esistenti (MIRET).



**Figura 3-21: Fattori di pericolosità e vulnerabilità combinati per un settore di una galleria dell'infrastruttura (Foria, 2021).**

Gli Indici di Priorità ottenuti possono essere classificati in categoria di CdA, così come spiegato rispetto alle LLGG. Nell'approccio MIRET gli stessi valori, basati su un approccio quantitativo, vengono suddivisi anche in quattro Classi di Priorità che consentono di rendere confrontabile tale valore con quello di altri elementi della linea ferroviaria e stabilire quali elementi/settori hanno priorità maggiore rispetto ad altri. Nello specifico, i limiti delle Classi considerati sono:

- Non prioritaria (verde), non devono sussistere indicazioni di possibili eventi;
- Priorità 3 (gialla), rientrano le aree dove almeno un parametro riporta condizioni di possibili eventi;
- Priorità 2 (arancione), rientrano le aree in cui due parametri riportano condizioni di possibile evento;
- Priorità 1 (rosso), rientrano le aree in cui si sommano almeno due indicazioni principali di evento.

### 3.3.3 Focus IA

Per ulteriori approfondimenti fare riferimento alle tesi (Lottini, 2021; De Vita, 2022) che rappresentano la raccolta tecnica e bibliografica di riferimento in merito a quanto svolto per il framework del seguente lavoro.

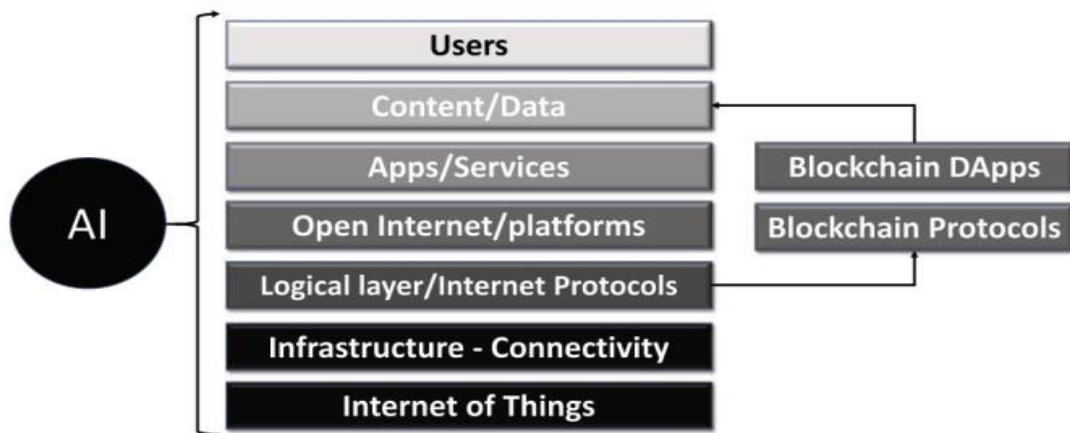
“The Gartner hype cycle” è un grafico pubblicato annualmente dalla società di ricerca e consulenza Gartner, essenzialmente il concetto descrive che cosa accade dopo che le nuove tecnologie entrano nella sfera pubblica. Le aspettative e il fervore che vengono generati sono spesso ineguagliati dalle capacità iniziali della tecnologia, come descritto dai ricercatori di Gartner, lo stadio di "innovazione" cede a quello di "aspettative gonfiate." Poco dopo, quando la tecnologia non soddisfa le aspettative, cade nella "depressione della disillusione". Con il tempo, la tecnologia matura raggiungendo la sua promessa e cede alla "fase dell'illuminazione" e alla fine al "plateau della produttività". Sono proprio le tecnologie associate all'Intelligenza Artificiale che attualmente stanno al top del Gartner hype cycle.

Ma quindi cos'è l'Intelligenza Artificiale? Vengono proposte varie definizioni, tutte però piuttosto ambigue in quanto si fa ancora fatica a dare una corretta definizione di “intelligenza umana”. Il termine “Intelligenza Artificiale” si riferisce alla disciplina che si occupa dello sviluppo di software che dato un obiettivo complesso, sono in grado di agire nella dimensione fisica o virtuale, in modo da percepire l'ambiente che li circonda, di acquisire e interpretare i dati, ragionare sulle competenze acquisite e formulare decisioni in modo tale da raggiungere l'obiettivo prefissato. L'AI è una tecnologia che potrebbe porre le basi per una rivoluzione di interi settori industriali, nonché migliorare l'interazione tra le imprese e i cittadini.

Gli esperti concordano nel considerare l'AI come un'opportunità senza precedenti per incrementare la produttività del lavoro e fare passi avanti verso lo sviluppo sostenibile. Inoltre, è importante precisare che l'AI non è intelligente in maniera assoluta. È necessario che le competenze umane siano complementari a quelle delle macchine, e che gli individui si specializzino in tutte quelle attività nelle quali l'essere umano è ancora superiore alla macchina, nonché nelle attività che permettono di saper utilizzare la macchina al meglio. Il potenziale dell'AI è tanto maggiore quanto più

sviluppato è l'ecosistema tecnologico e umano nella quale essa viene sviluppata e implementata, analizzare l'AI senza tener conto delle tecnologie ad essa associate sarebbe riduttivo.

Le applicazioni dell'Intelligenza Artificiale stanno progredendo molto nell'ultimo periodo non solo per gli ottimi risultati ottenuti dalla ricerca nel campo specifico dell'AI, ma anche per il progresso ottenuto nello *High Performance Computing* (più in particolare nello sviluppo dell'unità di elaborazione grafica, GPU), nelle tecnologie di banda larga, fissa e mobile, nella nanotecnologia e nell'internet delle cose (IoT).

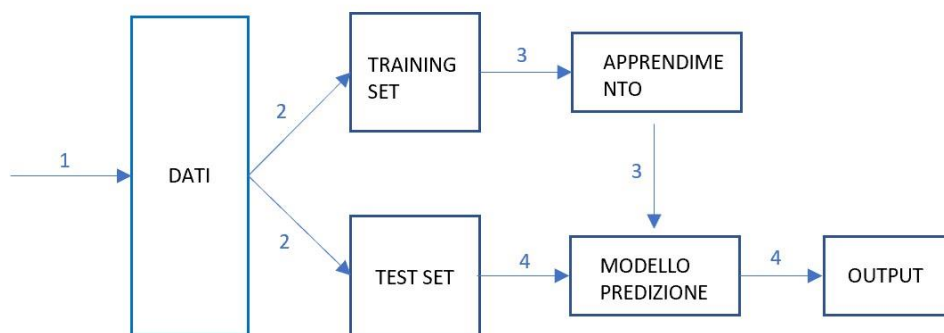


**Figura 3-22: Ecosistema delle tecnologie digitali.**

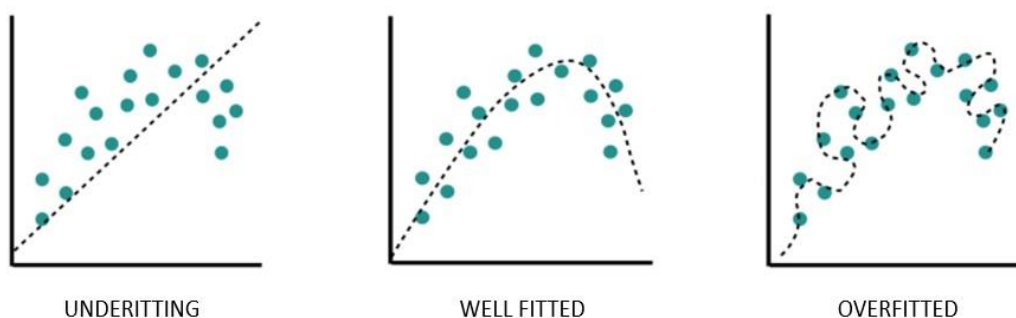
Il Machine Learning è considerato un sottoinsieme dell'AI e permette di creare software che “imparano come fa un bambino”, tramite gli esempi di input e corrispondente output riescono infatti a ricavare le regole per calcolare il risultato. Inoltre, le regole apprese vengono usate per migliorare il processo decisionale quando vengono immessi nuovi dati di input. Il Machine Learning viene definito più formalmente nella maniera seguente: “Dato un insieme di addestramento di N esempi definiti come coppie di dati input e output associato  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$  dove  $y_i$  è stato generato da una funzione non nota  $y = f(x)$ , trovare una funzione  $h$  che approssimi la funzione sconosciuta  $f$ ”. Il Machine Learning troverà una funzione  $h$  capace di giustificare meglio i dati in uscita e che, opererà bene su nuovi dati mai forniti precedentemente. È importante sottolineare che l'utilizzo del ML necessita di una visione statistica; infatti, una soluzione che approssima il risultato reale in buona percentuale non deve essere necessariamente considerata errata, se si dimostra abbastanza efficiente da risultare utile.

Le modalità di “addestramento”, ovvero il processo tramite il quale l’algoritmo di Machine Learning impara, sono classificabili in quattro categorie:

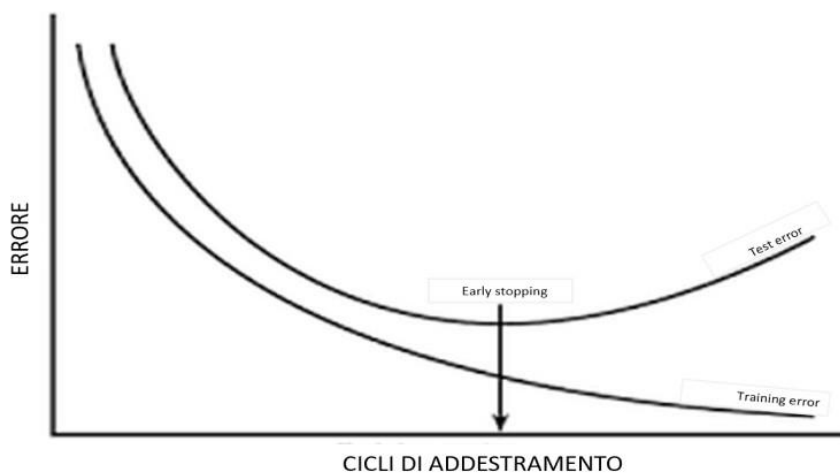
- Apprendimento supervisionato (Supervised learning) (Figura 3-23). In questa forma di apprendimento vengono mostrati all’algoritmo due set di dati cioè il dataset di input e il relativo set di output desiderato, per esempio un’immagine e un’etichetta (label) per descrivere l’oggetto contenuto, come se ci fosse realmente un maestro che supervisioni lo studente. Le coppie di dati vengono divise in maniera casuale in due gruppi distinti: training set (80% del totale) e test set (restate 20%). A seconda del modello scelto possono verificarsi alcuni problemi di apprendimento, può capitare infatti che nel caso in cui il modello sia troppo semplice l’algoritmo non riesca a comprendere bene la relazione input-output. In tal caso si parla di sotto-apprendimento (under fitting). Al contrario se il modello scelto è troppo complicato, quindi con troppi parametri, potrebbe presentarsi la possibilità che l’algoritmo comprenda una versione più complessa della realtà e che spieghi accuratamente la relazione input-output solo nel momento del training, dunque il modello non sarà in grado di generalizzare e non risponderà correttamente a dati diversi da quelli forniti durante l’addestramento. In questo caso si parla di sovra-apprendimento (over fitting). Un modello si dice ben addestrato se viene creato con il giusto compromesso tra semplicità e complessità, infatti si può accettare un errore maggiore nella fase di training set in cambio di un errore minore nel test. Una tra le tecniche utili ad evitare l’over fitting consiste nell’early stopping (arresto anticipato) (Figura 3-25), come si può notare dal grafico sottostante il modello si adatta meglio ai dati ad ogni ciclo di training fino ad un certo punto in cui l’errore sul validation test comincia ad aumentare. È opportuno dunque fermare l’allenamento dell’algoritmo prima che l’errore aumenti.



**Figura 3-23: Flusso delle informazioni, 1-2-3-4 (apprendimento), 1-2-4 (test).**



**Figura 3-24: Under fitting, well fitted e over fitting.**

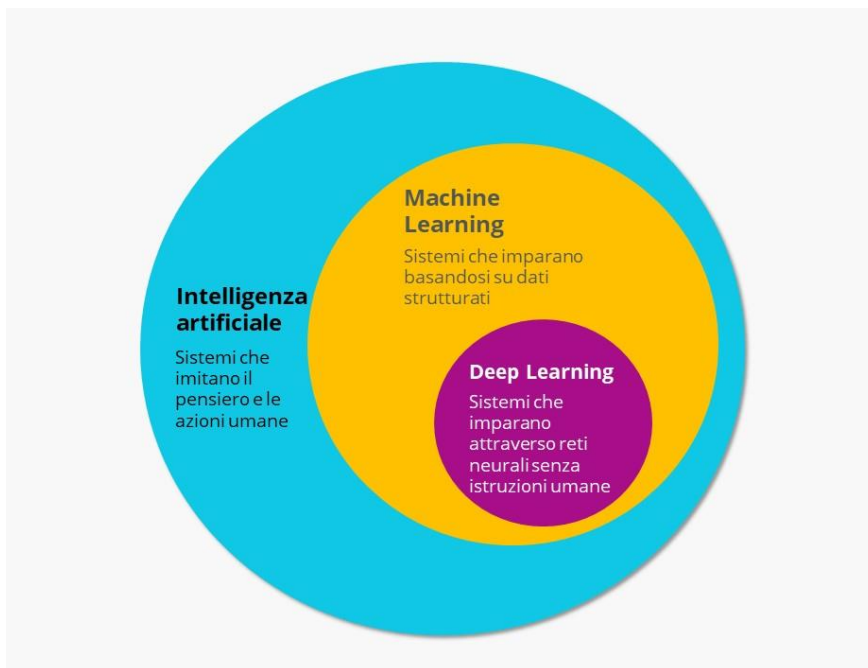


**Figura 3-25: Effetto dell'early stopping sulle funzioni di perdita nei set di training rispetto l'evoluzione dei cicli di training.**

- Apprendimento non supervisionato (Unsupervised learning). In questo caso vengono forniti all'algoritmo soltanto i dati di input, senza nessun relativo output, in modo tale che l'algoritmo crei in maniera automatica una qualche struttura dai dati in ingresso. Questo metodo è molto utilizzato nei problemi di clustering in cui bisogna trovare gruppi di dati in base alle caratteristiche simili.

- Apprendimento semi supervisionato (Semi-supervised learning). Consiste nella combinazione dei due approcci con una prima fase di supervised e una seconda fase di unsupervised.

Al giorno d'oggi le tecniche di Machine Learning sono usate in moltissimi ambiti tra cui, ad esempio, lo sviluppo di sistemi per il riconoscimento dei segnali e dei pedoni per i veicoli a guida autonoma, i sistemi di riconoscimento ed elaborazione del linguaggio, filtraggio dei contenuti sui social network etc. Queste applicazioni fanno uso di una sottoclasse del ML chiamata Deep Learning (DL), questa tecnica si sta sviluppando molto anche nell'ambito dell'ingegneria civile per lo sviluppo di algoritmi di rilevamento dei fenomeni di degrado. Il Deep Learning è una sottocategoria del Machine Learning e indica quella branca dell'Intelligenza Artificiale che fa riferimento agli algoritmi ispirati alla struttura e alla funzione del cervello, chiamati reti neurali artificiali (Figura 3-26).



**Figura 3-26: Suddivisione in sottoclassi.**

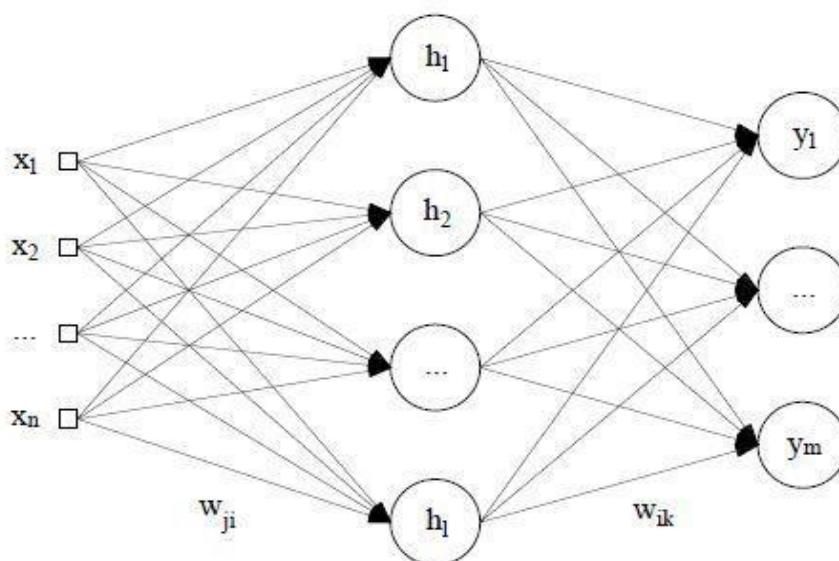
L'intelligenza umana è una proprietà dei neuroni che formano il cervello, per cui riproducendo le connessioni tra i neuroni che abbiamo nel nostro cervello tramite formule matematiche, si può creare una forma molto potente di AI. I neuroni biologici sono costituiti principalmente da tre elementi: il corpo centrale (soma), i dendriti e l'assone. La sinapsi è il punto di collegamento con i dendriti provenienti da altri neuroni, essa può favorire o ostacolare il collegamento tra i neuroni a seconda

dell'azione di sostanze chimiche dette neurotrasmettitori e solo al raggiungimento di una determinata soglia di attivazione dell'impulso elettrico. Il neurone artificiale, similmente a quello biologico può essere suddiviso in tre parti: un insieme di collegamenti caratterizzati da un determinato peso ( $w$ ), un raccordo che calcola la combinazione lineare di input e pesi dei collegamenti e una funzione di attivazione ( $g$ ) che produce un output in funzione del risultato che gli viene fornito. Inoltre, il bias ( $b$ ) consiste in un peso modificabile secondo la propensione del neurone di attivarsi in relazione agli input ricevuti.

L'algoritmo esegue i seguenti passi per simulare il neurone biologico:

- 1) Carica tutti i valori di input  $x_i$  e dei pesi  $w_i$  e  $w_o$ ;
- 2) Calcola la somma pesata dei valori di input;
- 3) Con il risultato della somma calcola in valore della funzione di attivazione  $g$ ;
- 4) Si ottiene l'output finale che rappresenta la risposta;

L'apprendimento nel Deep learning è di tipo "profondo" il che significa che sono presenti un numero di layer nascosti nella rete neurale chiamati hidden layer (le reti neurali profonde arrivano a contenere più di 150 hidden layer) (Figura 3-27).



**Figura 3-27: Rete neurale multistrato.**

L'addestramento della rete avviene attraverso la procedura di retro-propagazione dell'errore conosciuta anche con il termine "backpropagation". I valori dei pesi delle connessioni della rete neurale vengono inizializzati con opportuni valori, successivamente vengono forniti al modello i dati di training e viene calcolata la misura dell'errore commesso tra la previsione ed il target. La funzione errore ( $E(w)$ )

che si vuole minimizzare viene quindi derivata rispetto ai pesi e ciascun peso viene aggiornato per mezzo della seguente formula:

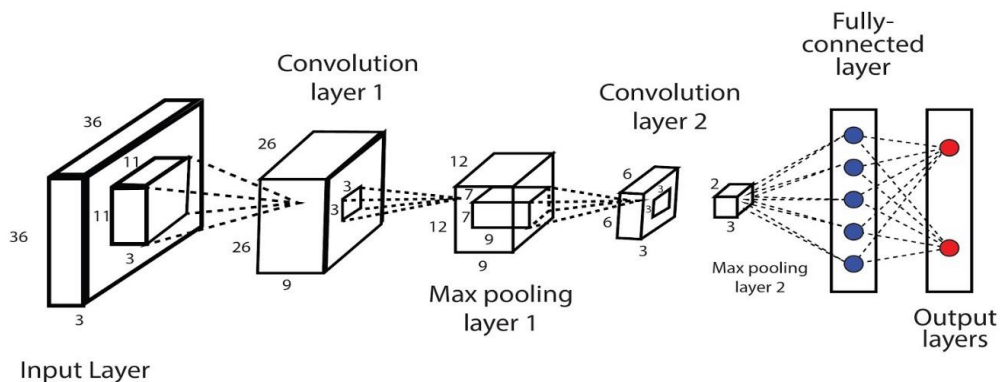
$$w_{t+1} = w_t - \alpha * \frac{\partial E(w)}{\partial w}$$

dove il parametro  $\alpha$  rappresenta il tasso di apprendimento (learning rate) che permette di regolare la modifica dei pesi rispetto all'andamento del gradiente. Questa procedura viene reiterata molte volte fino a quando la rete ha acquisito una prestazione accettabile.

Le reti neurali convoluzionali denominate anche come Convolution Neural Network (CNN) sono diventate molto note grazie alle ottime performance nella computer vision e nell'imgae processing. Questa tipologia di reti rientra nel gruppo del Deep Learning in quanto viene usata una grande quantità di neuroni organizzati in layer con elevate profondità. Le CNN che si occupano di segmentazione delle immagini considerano i dati secondo la loro organizzazione spaziale e l'input viene gestito come una matrice, i neuroni invece di essere collegati a tutti i neuroni dello strato precedente sono collegati soltanto ai neuroni vicini e hanno tutti lo stesso peso.

Le reti convoluzionali sono formate da una sovrapposizione di moduli computazionali suddivisi in due parti come mostrato in Figura 3-28:

- Estrazione di feature direttamente dall'immagine, tramite una combinazione di layer denominati convolutional, normalization e pooling;
- Algoritmo di Machine Learning per la classificazione finale, prende in input le informazioni estratte che a questo punto sono poche rispetto a tutti i pixel dell'immagine iniziale.



**Figura 3-28: Architettura di una CNN per la classificazione di immagini.**

Ogni hidden layer nella prima parte esegue queste operazioni:



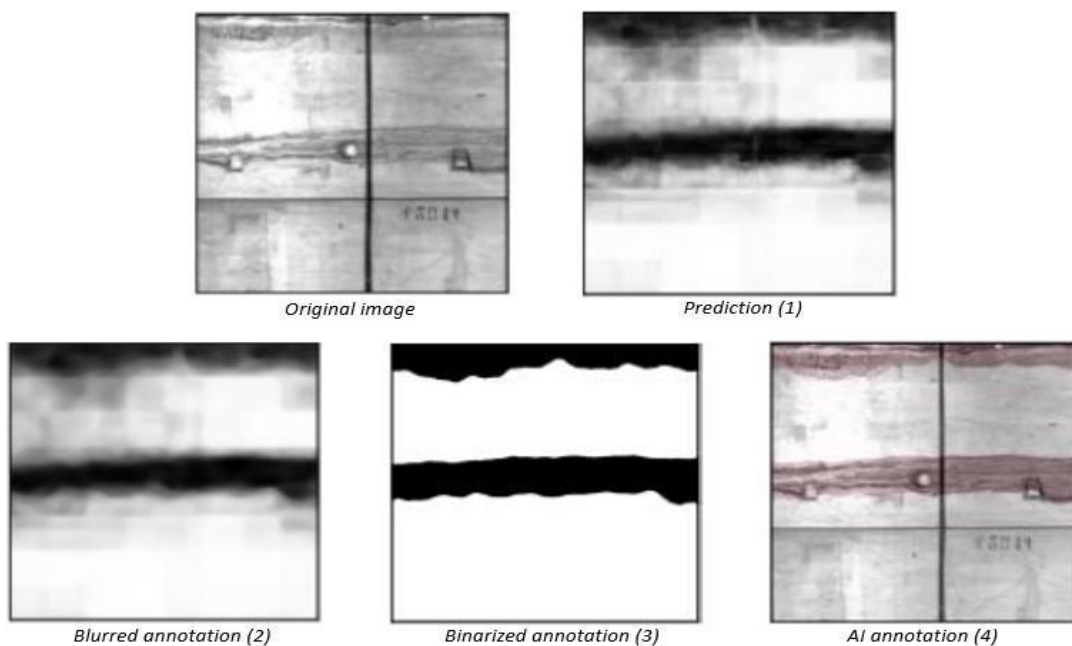
- L'input del WaterSegNet è costituito da immagini in scala di grigi di dimensione 512x512 acquisite tramite il Tunnel Scan di Archita, a differenza della rete originale che invece utilizzava immagini a colori RGB;

Numero di epoche di training diverso a causa della dimensione diversa del dataset a disposizione.

L'allenamento della rete è stato eseguito in una galleria in calcestruzzo di circa 500 metri tramite la tecnica della retro-propagazione dell'errore. La scelta delle immagini di addestramento e di validazione è stata eseguita scartando le immagini con difetti dubbi o con estensione piccola rispetto alla grandezza dell'immagine. Inoltre, alcune immagini sono state modificate per migliorare la luminosità, il contrasto e la rotazione. Il dataset ottenuto è stato successivamente suddiviso in sottoinsiemi di training e validation test con una proporzione di circa 75% e 25%. L'algoritmo è stato inserito all'interno di un programma dedicato alla digitalizzazione dei difetti, in una prima fase l'algoritmo esamina la galleria e predice la segmentazione, successivamente sono state introdotte due operazioni denominate thresholding e blurring la cui calibrazione è a discrezione dell'operatore in funzione delle caratteristiche del dataset analizzato.

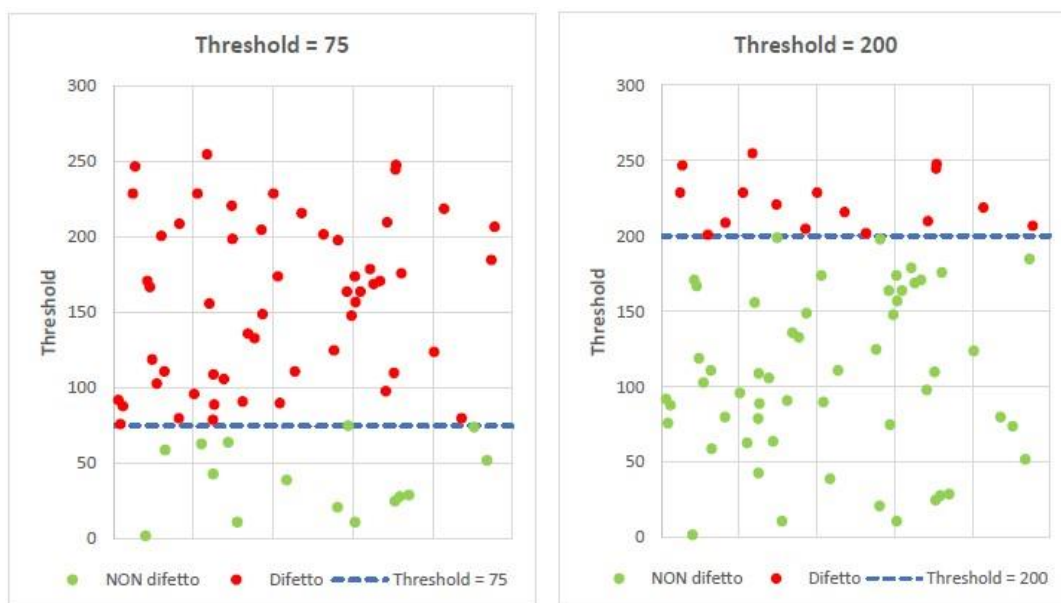
L'algoritmo esegue la segmentazione delle immagini nel modo seguente (Figura 3-30):

- Effettua una predizione sulla base dell'allenamento ricevuto. Ciascun pixel dell'immagine assume un valore pari alla probabilità che quel pixel possa rappresentare un difetto;
- Media i valori dei pixel della predizione in funzione del parametro Blur size (Blurred annotation);
- Esegue la binarizzazione dei pixel dell'immagine sulla base dei valori impostati dal parametro Threshold (Binarized annotation). Questa viene eseguita assegnando ai pixel maggiori della soglia la classe 1 (presenza del difetto), mentre ai pixel con valore minore della soglia viene assegnata la classe 0 (assenza del difetto);
- Restituisce la digitalizzazione dei difetti (AI annotation).



**Figura 3-30: Schema delle fasi di elaborazione dell'algorithm.**

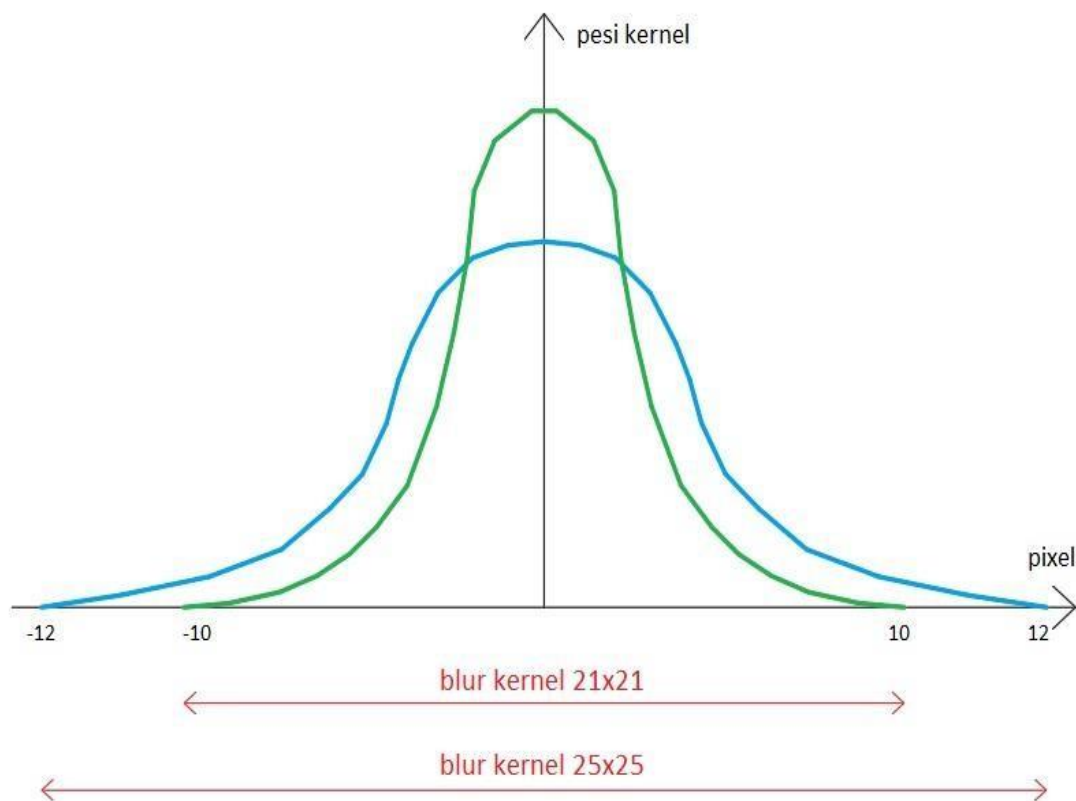
Il parametro Threshold rappresenta il limite (soglia) di riconoscimento del difetto. Questo parametro può variare dal valore 0 a 255, impostando il valore 0 l'algorithm cataloga ogni pixel come difetto, al contrario impostando la soglia su 255 non viene riconosciuto nessun difetto (Figura 3-31).



**Figura 3-31: Catalogazione difetti con Threshold = 75 (sinistra) e 200 (destra).**

Il parametro Blur size rappresenta il grado di sfocatura del contorno e può assumere valori compresi tra 0 e 31 che rappresentano la dimensione del kernel di sfocatura. Tramite l'operazione di blurring il valore di ogni pixel viene mediato con quelli del suo intorno con lo scopo di ridurre i rumori dell'immagine. L'operazione di blurring

può essere vista come un filtro (kernel) applicato all'immagine, i valori dei pixel sui quali è centrato il filtro assumono un peso elevato mentre i pesi dei pixel più lontani diminuiscono via via che ci si allontana dal centro del filtro. Il kernel può essere rappresentato tramite una gaussiana (Figura 3-32), incrementando la dimensione del kernel aumenta la grandezza della regione considerata nell'operazione di convoluzione ma allo stesso tempo diminuisce il peso del pixel centrale in quanto l'area sottesa dalle distribuzioni gaussiane deve essere sempre unitaria. Aumentando la dimensione del kernel i pesi al centro del filtro acquistano sempre meno importanza mentre quelli più lontani saranno caratterizzati da valori maggiori.



**Figura 3-32: Rappresentazione monodimensionale dei pesi del kernel di sfocatura al variare del parametro Blur size: in verde Blur size=21, in azzurro Blur size=25.**

### 3.3.4 Versanti e Scarpate

Il principio del MIRET è applicabile anche ad altri elementi dell'infrastruttura, con le relative differenze di sistema, compresi i versanti e le scarpate (Foria, 2020; Foria, 2021). La fase iniziale dell'Analisi di Priorità dei versanti e delle scarpate è definita dalla raccolta dei dati con lo scopo di ottenere il quadro sinottico dello stato di fatto in

cui versa l'infrastruttura. La raccolta dei dati (Figura 3-34) è organizzata su quattro livelli, come descritto nelle sezioni seguenti.

Il primo livello è l'analisi bibliografica che consiste nella raccolta di dati esistenti sull'area interessata: carte geologiche, inventari ufficiali delle frane, dati di spostamento superficiale (InSAR) dal Geoportale Nazionale e altre fonti di GeoData aperte. Lo sfruttamento di questi archivi può supportare l'esecuzione di studi di frana sia su larga che su piccola scala, supportando:

- Valutazione dell'estensione areale delle frane;
- Rilevamento di fenomeni non mappati;
- Valutazione dell'attività franosa.

Il secondo livello è rappresentato da un volo Lidar (Figura 3-33) effettuato lungo tutta la linea ferroviaria, su un corridoio largo circa 400 m, da cui è possibile ottenere un DTM (Digital Terrain Model) e DSM (Digital Surface Model) ad alta risoluzione dell'area (pixel di 50 cm) e un'ortofotografia dettagliata (pixel di 10 cm).

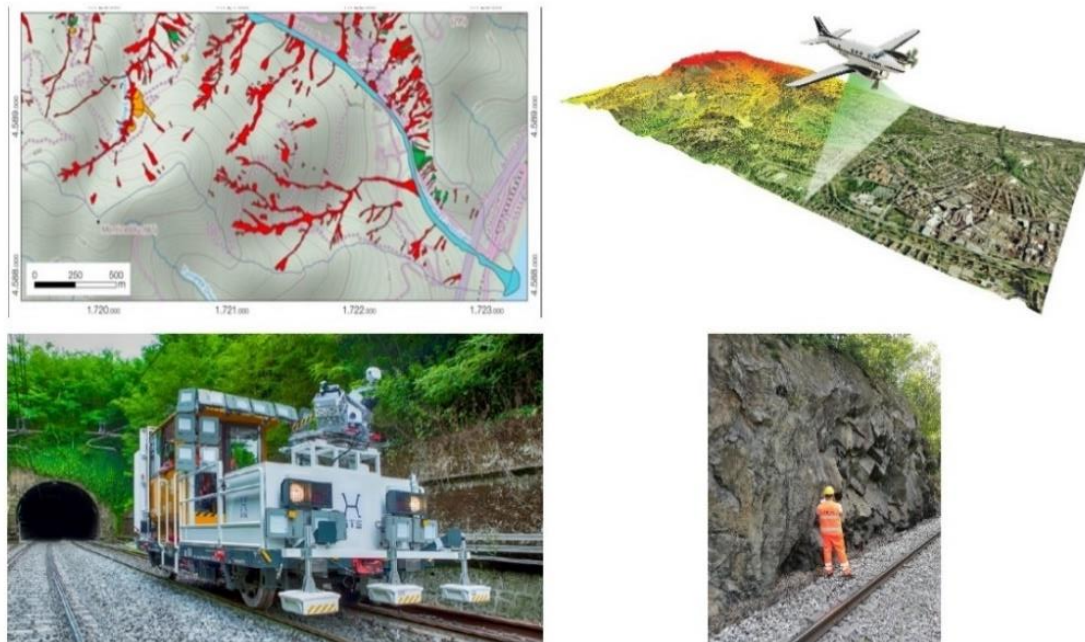
Dopo l'analisi effettuata sui dati bibliografici e l'acquisizione dei dati topografici, viene utilizzato un sistema mobile mapping sviluppato da ETS per il rilievo delle pendenze delle trincee, generalmente visibili solo dalla linea: ARCHITA (Fiora, 2019; Figura 3-33). Come descritto in precedenza, l'acquisizione dei dati avviene con limitato disturbo della circolazione del traffico, in quanto il sistema permette di rilevare l'intera infrastruttura a velocità sostenuta (i.e. 15-30 km/h) con un unico passaggio. I dati ottenuti da rilievo laser scanner e Lidar possono essere integrati/sovrapposti grazie al metodo di georeferenziazione ad alta precisione adottato per i sistemi di rilevamento.

L'ultimo livello è l'ispezione lungo la linea (Figura 3-33), che è complementare ai precedenti, ed è finalizzata alla raccolta di dati diretti su:

- Geologia e geomorfologia locale, compresa la caratterizzazione geotecnica e geomeccanica dei materiali delle trincee, eseguendo prove in loco;
- Opere/strutture di bonifica dei pendii esistenti e loro condizioni;
- Evidenza di instabilità, fenomeni erosivi, etc.

Inoltre, alcuni campioni di terreno/roccia rappresentativi di ciascun litotipo vengono raccolti durante le indagini sul campo e vengono utilizzati per le prove di

laboratorio di suolo e meccanica delle rocce per definire i parametri costitutivi per l'analisi preliminare di stabilità dei pendii su ogni porzione considerata.

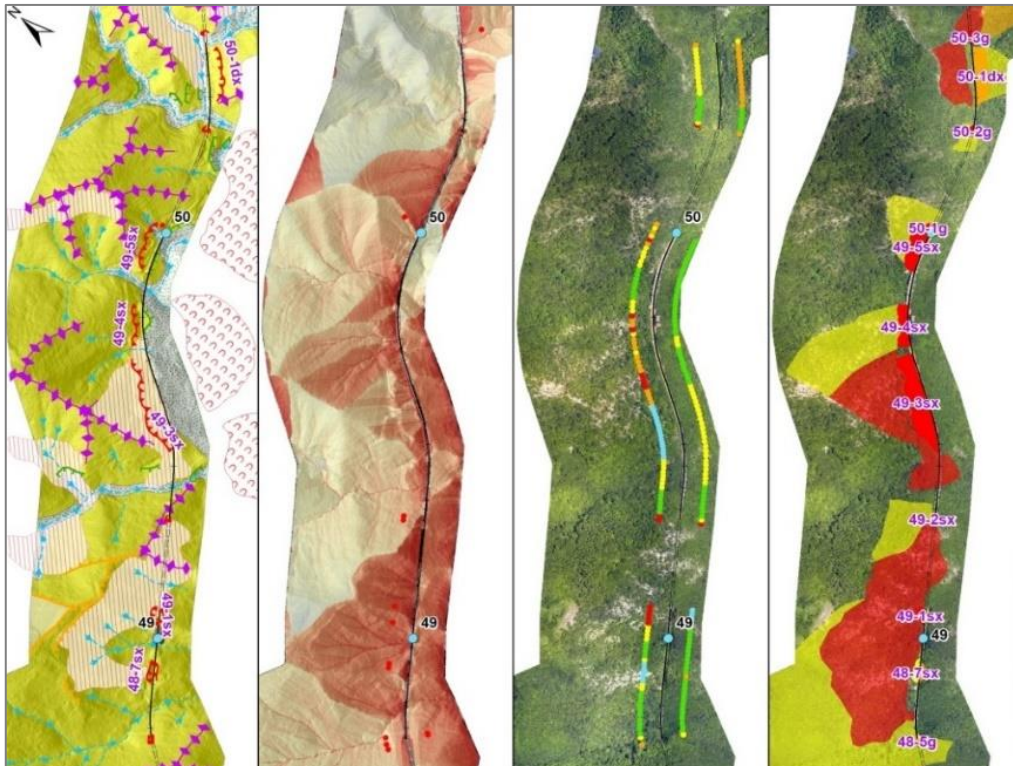


**Figura 3-33: Raccolta dati. In alto a sinistra l'analisi bibliografica, in alto a destra rilievo con Airbone Lidar, in basso a sinistra rilievo mobile mapping, in basso a destra ispezioni in linea (Foria, 2020; Foria, 2021).**

I dati vengono digitalizzati e combinati in complesse analisi che consentono la mappatura dei versanti e delle scarpate lungo la linea ferroviaria attraverso l'identificazione della probabilità spaziale di accadimento delle frane e di altri eventi critici con una Analisi Spaziale Multi-criteriata (SMCA) (Foria, 2021b). Al fine di effettuare l'SMCA, il tratto di linea ferroviaria indagato viene suddiviso in segmenti della lunghezza di 10 metri ciascuno, analizzando separatamente il lato destro da quello sinistro. L'indicatore viene calcolato con parametri calibrati sui casi studio disponibili. L'Indice di Priorità definisce il livello di attenzione o condizione che determina l'ordine di gestione degli elementi infrastrutturali in base alla loro importanza relativa. Tale valutazione mira a gestire e identificare il rischio per le infrastrutture esistenti per la gestione strategica delle risorse e degli asset infrastrutturali. Gli Indici di Priorità ottenuti rientrano in quattro Classi di Priorità che consentono di stabilire quali settori della linea ferroviaria hanno priorità maggiore rispetto ad altri. Nello specifico i limiti delle Classi considerate:

- Non prioritaria (verde), non devono sussistere indicazioni di possibili dissesti;

- Priorità 3 (gialla), rientrano le aree dove almeno un parametro riporta condizioni di possibile instabilità;
- Priorità 2 (arancione), rientrano le aree in cui due parametri riportano condizioni di possibile instabilità;
- Priorità 1 (rosso), rientrano le aree in cui si sommano almeno due indicazioni principali di dissesto.



**Figura 3-34: Un esempio di Analisi di Priorità per la gestione dell'infrastruttura ferroviaria. La figura mostra un'applicazione per le frane. Da sinistra a destra: Carta Geomorfologica, Carta dell'Indice di Connettività (i punti rossi indicano il superamento di un valore di soglia), Valore dell'Indice finale, calcolato ogni 10 m lungo la linea, su entrambi i lati, e Carta di Priorità (Foria, 2021b).**

Questo processo è importante per evidenziare immediatamente le criticità e intervenire tempestivamente individuando le cause dei danni e per pianificare gli interventi di manutenzione in modo efficace ed efficiente (Foria, 2021b). Al fine di rendere più fruibili i risultati è stato sviluppato uno strumento WebGIS che consente di consultare i risultati delle analisi senza la necessità di utilizzare software dedicati di gestione e rappresentazione dei dati geografici, con possibilità di utilizzo da parte di qualsiasi utenza abilitata.

### 3.3.5 *Cambiamento climatico*

Questo progetto si propone di trattare preliminarmente anche il tema della vulnerabilità dell'infrastruttura al cambiamento climatico, come modulo ed estensione della metodologia MIRET. Il progetto è strutturato in diversi modelli a seconda del tipo di analisi (ad es. ispezione, allerta precoce, pianificazione) e dell'elemento considerato (ad es. pendii, alveo, gallerie). Il modulo sui cambiamenti climatici mira a sviluppare indicatori e servizi co-creati per assistere il processo decisionale nella gestione del rischio delle infrastrutture. Lo sviluppo del cambiamento climatico porterà a un modulo con informazioni sul cambiamento climatico per gestire le infrastrutture considerando diversi scenari futuri basati sugli RCP ad una scala di dettaglio delle opere analizzate (Bucchignani, 2016; MATTM, 2017).

Gli indicatori di cambiamento climatico saranno progettati sulla base della co-creazione e del coinvolgimento degli utenti per raccogliere informazioni sulla vulnerabilità delle infrastrutture, su come le variabili meteo-climatiche interessano le infrastrutture e su come definire azioni strategiche di adattamento e mitigazione per affrontare le sfide derivanti dagli impatti del cambiamento climatico. Gli indicatori saranno calcolati in diversi scenari a seconda delle esigenze degli utenti. La co-creazione di indicatori sui cambiamenti climatici è una metodologia complessa che comprende il coinvolgimento degli stakeholder, la co-costruzione e la verifica delle esigenze degli utenti in materia di informazioni sul clima e fornisce ai decisori strategie di adattamento alla resilienza climatica (Barnet., 2021). Questo rapporto si riferisce alla prima parte del processo di co-costruzione degli indicatori: i workshop in cui gli stakeholder hanno contribuito con i loro punti di vista e le loro informazioni allo sviluppo degli indicatori necessari per il processo decisionale (Figura 3-35).

Tali appuntamenti sono stati analizzati successivamente da un team di specialisti composti dall'Universitat Rovira I Virgili (Barnet, 2021) ed ETS Srl (Foria, 2022) per l'individuazione e la quantificazione dei parametri di vulnerabilità al cambiamento meteo-climatico per le infrastrutture. Tale approccio quantitativo non è oggetto del presente studio, che si concentra sull'aspetto tecnico metodologico esposto.



***Figura 3-35: Workshop ETS-URV-Stakeholders, Roma 2022.***

Tutti i tipi di mobilità e trasporto di persone, merci e risorse sono caratteristiche essenziali delle società contemporanee. Pertanto, le infrastrutture che lo rendono possibile hanno un valore sociale e la loro gestione del rischio è fondamentale per il funzionamento ottimale dei flussi di mobilità. Tuttavia, fino ad ora, la gestione del rischio nelle infrastrutture di mobilità non ha considerato gli effetti dei cambiamenti climatici sulle strutture. Ora che l'impatto del cambiamento climatico è sempre più evidente, è necessario considerarlo come un possibile fattore di rischio per le infrastrutture di mobilità e gli utenti. L'obiettivo finale di questo progetto è quello di fornire informazioni ai gestori per prendere decisioni intelligenti dal punto di vista climatico per la gestione del rischio nelle infrastrutture di mobilità, sviluppando strategie efficienti ed efficaci per ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici sulle infrastrutture esistenti.

L'esplorazione dei dati necessari per coadiuvare il processo decisionale deve essere trasversale: coinvolge la partecipazione delle parti interessate e mescola tutte le conoscenze della società con la scienza, per ottenere gli indicatori co-creati.

Gli indicatori sono dettagliati all'interno dell'infrastruttura (ponti, gallerie, stazioni ed elementi lineari), calibrati con dati passati e scenari da analisi climatiche multi-fisiche e implementati in software.

Gli indicatori co-creati vengono testati e validati con dati passati ad alta risoluzione temporale e spaziale, per proiettarli negli scenari dei modelli CIMP6.

I dati climatologici grigliati dell'ERA5 (Hersbach et al., 2020) con una risoluzione spaziale di 0,250x0,250 (~ 30 kmx30 km), i dati acquisiti localmente di almeno un decennio e la discretezza temporale di 1 ora vengono utilizzati per estrarre il risultato più alto. Con questo approccio supportiamo e diamo risultati ai clienti per prendere decisioni su misura e intelligenti dal punto di vista climatico.

```
669     x3<-1
670 }else if(cd_windDay >= b & cd_windDay < c){
671     x3<-2
672 }else if(cd_windDay >= c & cd_windDay <= d){
673     x3<-3
674 }else{
675     x3<-0}
676 }
677 CD_windDay<-sapply(cd_windDay,FUN=cons_windDay)
678
679 #WIND BASED
680 wind_Df<-cbind.data.frame(day,DailyWS,iswindyday,CD_windDay)
681
682 windBased<-rowSums(Temp_Df[2:4])
683
684 plot (IRI_ROAD_v1)
685
686
687
688 #SKY BASED###
689 tcc<- read_csv("tcc_2010-2020.csv")
```

**Figura 3-36: Analisi ei dati con il software Climate Data Operators.**

### 3.3.6 Integrazione dati

Gli elementi gallerie, versanti e scarpate sono analizzati con approcci qualitativi comparabili tra di loro, rendendo possibile l'integrazione degli indici sintetici per una visione integrata lungo l'infrastruttura.

Il modulo del Cambiamento Climatico è integrato nell'approccio generale e nella piattaforma, per la gestione di tutti i rischi delle principali opere civili; infatti le informazioni risultanti da questo processo vengono visualizzate e interrogate lungo l'infrastruttura considerata per tutti gli elementi in un sistema del tipo WebGIS.

## Capitolo 4

### APPLICAZIONE A CASO REALE: INFRASTRUTTURA FERROVIARIA E STRADALE

#### 4.1 Introduzione

Nel seguito si illustra un'applicazione pratica di quanto esposto nel capitolo 3, secondo i concetti e i principi esposti nel capitolo 1 e 2, su un progetto pilota di diverse linee ferroviaria in Italia e di un focus specifico sull'IA per una rete stradale del Lazio. I dati sono sintetizzati allo scopo del presente studio o rappresentativi di campagne di acquisizione svolte. In nessun caso hanno lo scopo o la pretesa di analizzare situazioni reali lungo le aree rappresentate, e sono al solo scopo del presente studio. Per ulteriori approfondimenti fare riferimento, ove disponibile, alle pubblicazioni e alle tesi richiamate nel corso del testo.

#### 4.2 Applicazione MIRET: focus Rischio

Nel seguito si illustrano i risultati dell'applicazione di MIRET e ARCHITA per le gallerie, i versanti, le scarpate e il cambiamento climatico di una linea ferroviaria tra Roma e Napoli. I dati sono sintetizzati allo scopo del presente studio o rappresentativi di campagne di acquisizione svolte. In nessun caso hanno lo scopo o la pretesa di analizzare situazioni reali lungo le aree rappresentate, e sono al solo scopo del presente studio. Questa applicazione si focalizza sulla valutazione quali-quantitativa del Rischio attraverso la definizione degli Indici di Priorità. Per ulteriori approfondimenti fare riferimento, ove disponibile, alle pubblicazioni richiamate nel corso del testo.

##### 4.2.1 Gallerie

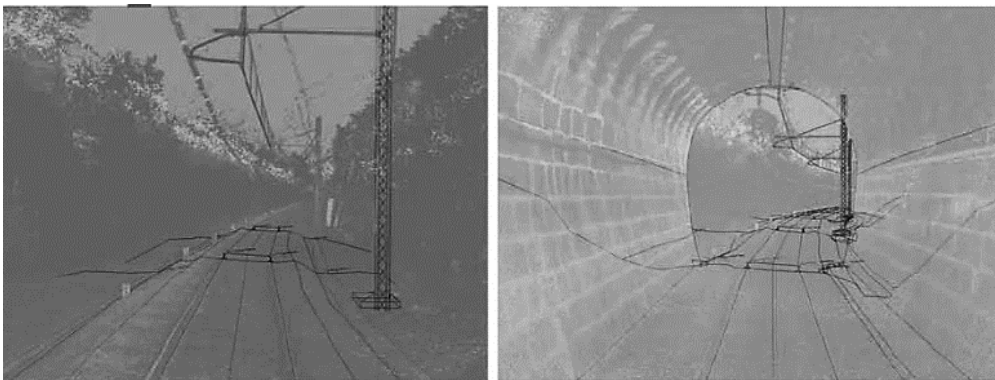
Le metodologie e le tecnologie esposte in precedenza permettono di svolgere il rilievo e l'ispezione anche di centinaia-migliaia di km con impatto minimo sulla linea. In quest'area si sono analizzati 170 km ca. di gallerie (costruite nei primi del '900) con rivestimento principalmente in muratura ed elettrificate.



**Figura 4-1: Foto di gallerie rappresentative dell'area analizzata.**

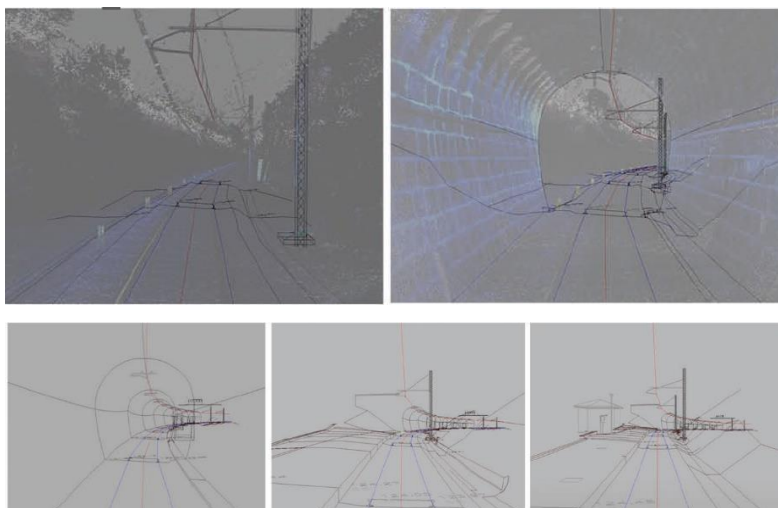
Al fine di poter fornire gli strumenti di supporto ai processi decisionali, si parte dalla ricostruzione geometrica dell'infrastruttura, e la valutazione delle interferenze geometriche, Figura 4-2 (in accordo con le norme attualmente vigenti).

L'approccio digitale è stato eseguito con Workflow OpenBIM *ad-hoc* con l'obiettivo di: avere un migliore controllo sui processi di analisi, sfruttare a 360° i dati acquisiti per restituire fedelmente l'Opera ed avere una Base Dati coerente per affrontare le fasi successiva di pianificazione e progettazione.



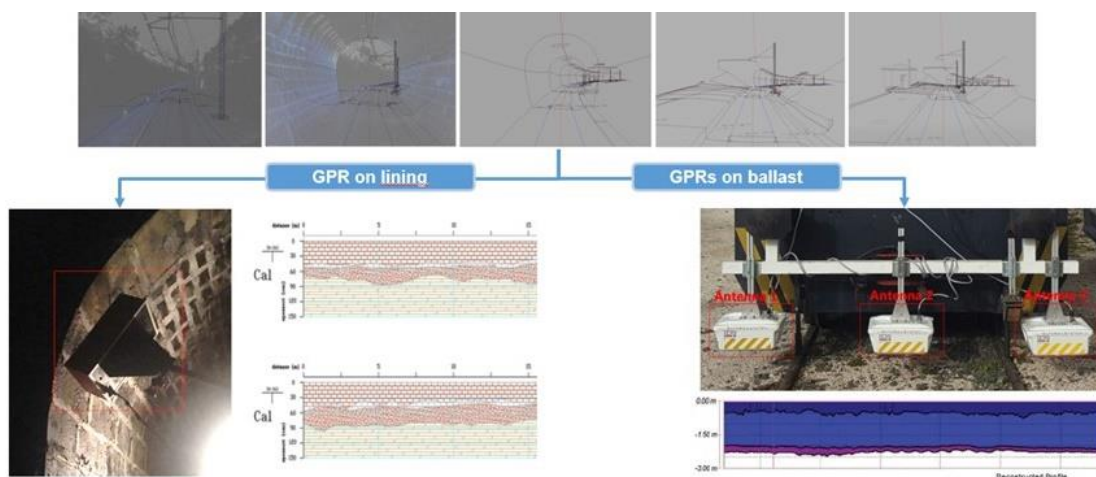
**Figura 4-2: Ricostruzione geometrica da nuvola di punti a digitalizzazione 3D (Foria, 2022).**

Il processo è raffigurato in Figura 4-3 e Figura 4-4. Partendo dalle geometrie (Nuvola di Punti e CAD 3D) e dai dati qualitativi (che caratterizzano stratigrafie e spessori) ricavati tramite ARCHITA, sono costruite delle sezioni parametriche relative allo stato di fatto del rivestimento e della massicciata che poi vengono estruse seguendo l'andamento della galleria. Si impiega come guida le polilinee 3D caratteristiche estratte dalla Nuvola di Punti.



**Figura 4-3: Raffigurazione della transizione da nuvola di punti (rilievo ARCHITA) a digitalizzazione CAD 3D (Foria, 2022).**

Qualora possibile, i dati del GPR sono integrati e/o tarati con informazioni puntuali, come micro-carotaggi strutturali e/o carotaggi geognostici.

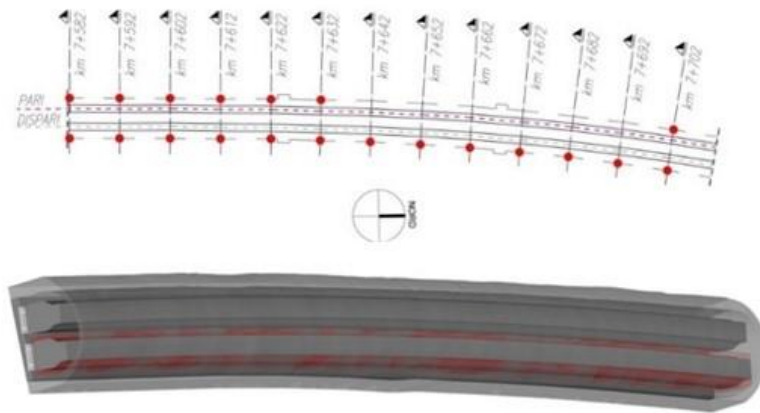


**Figura 4-4: Processo di digitalizzazione 3D integrando laser scanner e GPR (Foria et al., 2019).**

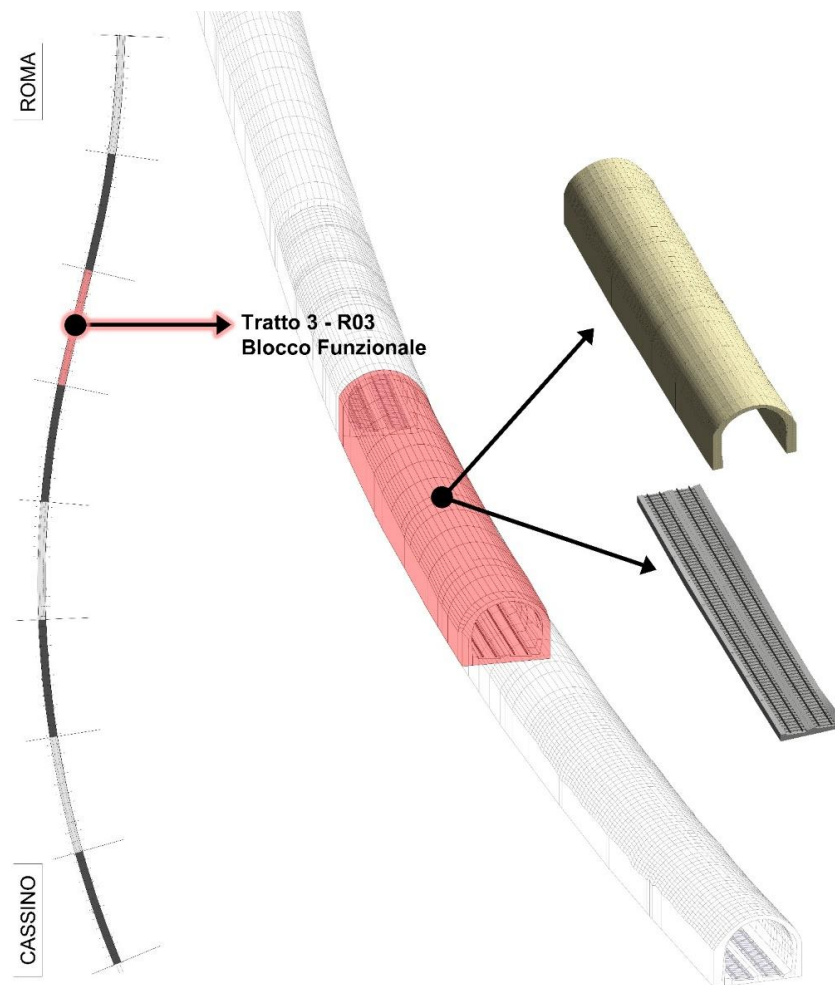
I singoli Modelli Informativi seguono una scomposizione dell'opera secondo Blocchi Funzionali, a loro volta suddivisi in Discipline, affidati a singoli tecnici e coordinati tramite un Modello Federato sito nell'ACDat proprietario. Tale metodologia permette di creare un vero e proprio ufficio virtuale, dove una rete di autori parla la stessa lingua e interviene in misura controllata sul processo.

Nell'approccio MIRET, gli output di ARCHITA sono stati integrati in un flusso di lavoro open BIM per ottimizzare la gestione del dato e delle analisi di interferenze. Il

modello è così impiegato per verificare anche eventuali aspetti di interferenza geometrica con l'esercizio ferroviario in automatico (Figura 4-5 e Figura 4-3).

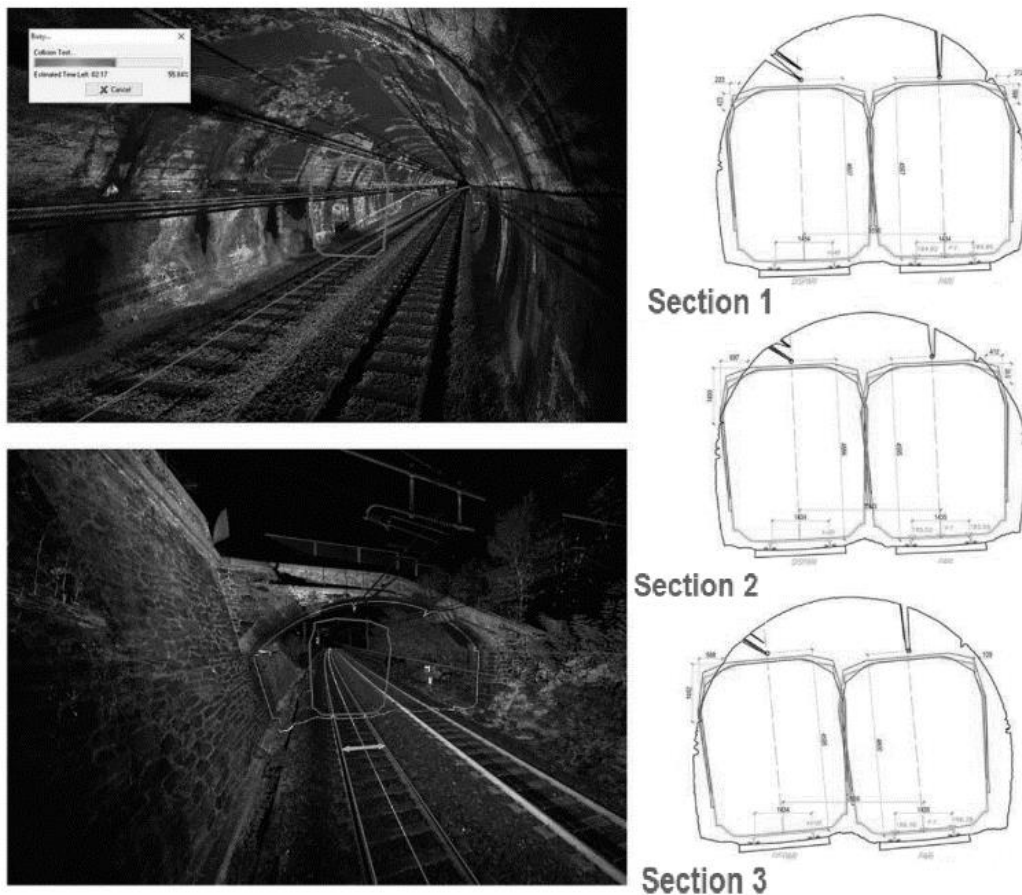


**Figura 4-5: Modello dello Stato di Fatto generato con flusso open BIM per una galleria con la rappresentazione dei convogli per l'analisi di sagoma (Foria, 2021).**



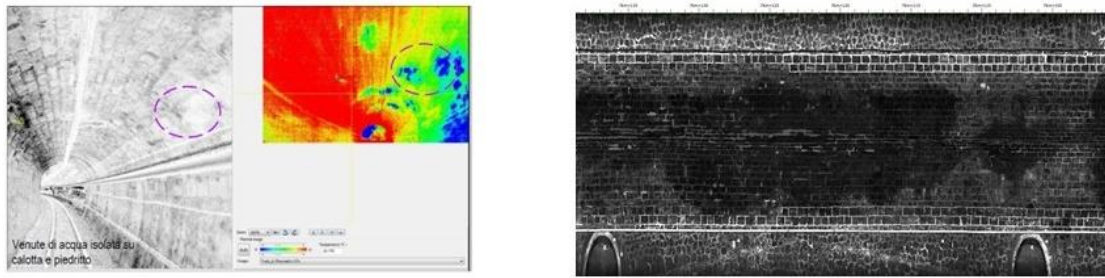
**Figura 4-6: Scomposizione dei modelli dello Stato di Fatto in Blocchi Funzionali e Discipline (Foria, 2019).**

Questa analisi è particolarmente rilevante per verificare l'adeguatezza della linea ferroviaria rispetto alle esigenze di traffico veicolare, all'adeguamento per nuovi standard di trasporto (e.g. impianti, sicurezza) o per esigenze di interfaccia tra diversi sistemi di trasporto. Ad esempio, per le linee ferroviarie oggetto di analisi, è stata assunta la codifica dell'unità di carico P/C80 (P= carri Poche, C= casse mobili e container). Inoltre, tra la sagoma limite del materiale trasportabile e qualsiasi ostacolo fisso presente lungo la linea ferroviaria deve essere garantito un franco minimo che, aggiunto alla sagoma limite del materiale rotabile, determina il "Profilo Minimo degli Ostacoli" (PMO).



**Figura 4-7: Analisi di transitabilità lungo il tracciato (Foria, 2019).**

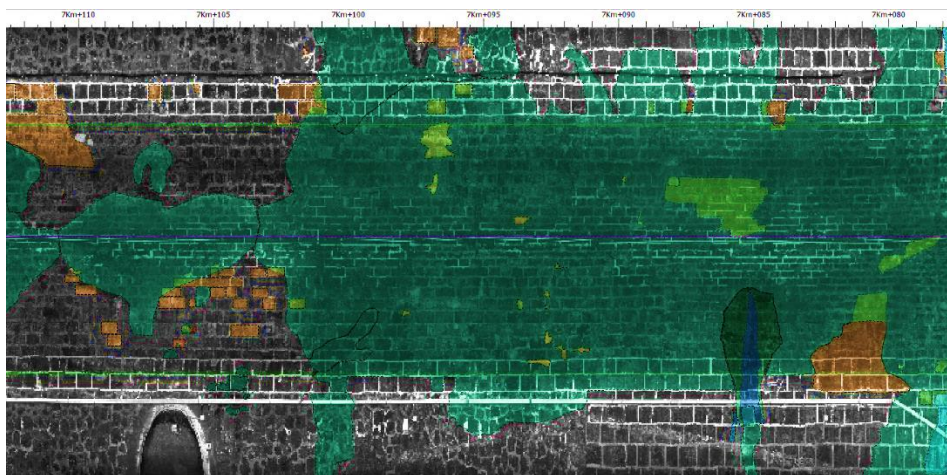
Il rilievo ha permesso di avere informazioni anche sullo stato di conservazione dei rivestimenti (immagini ad alta risoluzione e termocamere), oltre che su informazioni qualitative di tipo più profondo nei rivestimenti e nella massicciata grazie al GPR.



**Figura 4-8: Diagnostica della galleria attraverso immagine termiche (sinistra) e foto ad alta risoluzione (destra) (Foria et al., 2019).**

Nello specifico ambiente digitale, è possibile mettere a sistema le immagini termiche e le foto ad alta risoluzione per identificare le anomalie. All'interno di una galleria, a prescindere dal materiale da cui è costituito il rivestimento, le problematiche strutturali che si possono riscontrare sono molteplici, e qualsiasi sia la dimensione non devono mai essere sottovalutate, in quanto sono sintomo di un possibile degrado della struttura che con il passare del tempo può risultare pericoloso in termini di servizio e di sicurezza.

Per poterle meglio gestire si ha la necessità di identificare e catalogare tali problematiche rispetto a un'opera costruita a regola d'arte. Da questa procedura di identificazione e catalogazione nascono i cosiddetti "Cataloghi dei difetti". La mappatura delle anomalie costituisce il parametro di vulnerabilità della struttura di galleria. Ad esempio, in Figura 4-9, si evidenziano principalmente fenomeni di infiltrazioni d'acqua, distacchi e lesioni lungo i giunti di muratura, che rappresentano le problematiche principali in questi tipi di gallerie.



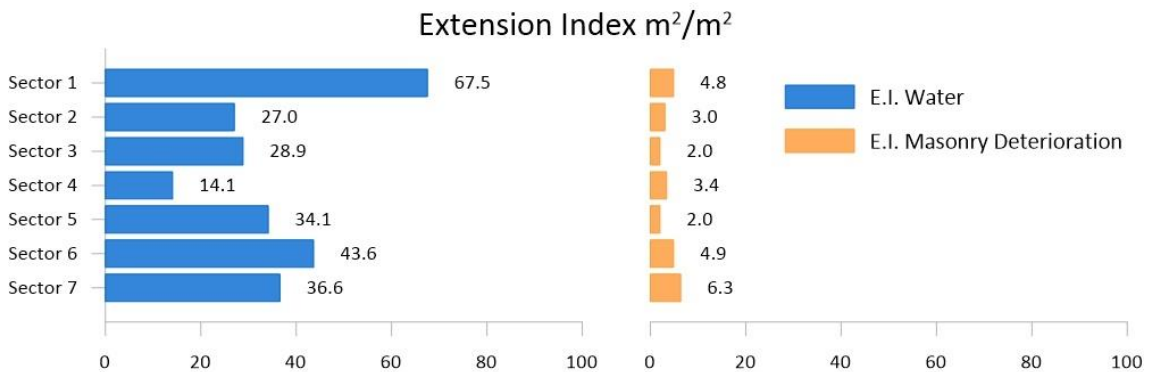
**Figura 4-9: Mappatura dei difetti sulla struttura della galleria (Foria, 2022).**

Come si evince da Figura 4-10 e Figura 4-11, l'ambiente digitale permette di manipolare ed esportare facilmente le informazioni in diversi formati consolidati e interscambiabili. Questo approccio digitale semplifica la relazione tra le informazioni per la determinazione dell'Indice di Priorità (Figura 4-12).



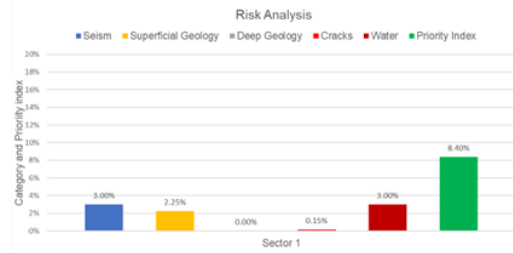
**Figura 4-10: Mappatura dei difetti esportata in ambiente CAD (Foria, 2022).**

L'utilizzo di un approccio basato sull'analisi multicriteria permette di individuare un Indice di Priorità sintetico combinando i parametri esposti al capitolo precedente, rappresentativo di ogni settore. La visione degli indici, sia delle classi di anomalie, sia di Priorità, permette di visualizzare subito le aree più critiche, classificarle e adottare le strategie decisionali.



**Figura 4-11: Indici di estensione per classi di anomalie (Foria, 2022).**

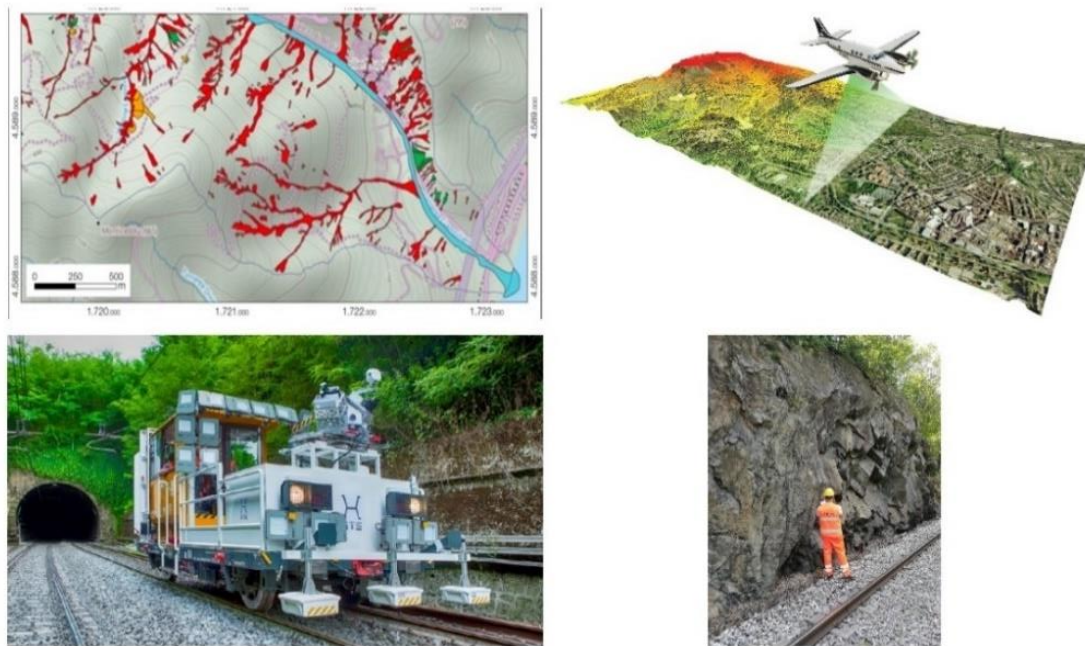
Inspection 2019 (T1)		
Sector 1		
Category	Category Index	SMCA
Seism	20.00%	3.00%
Superficial Geology	15.00%	2.25%
Deep Geology	0.00%	0.00%
Cracks	0.93%	0.15%
Water	2.67%	3.00%
Priority Index		8.40%



**Figura 4-12: Esempio di calcolo di Indici di Priorità per un settore di una galleria (Foria, 2021).**

#### 4.2.2 Versanti e Scarpate

A seguito della raccolta dati e della generazione del database, come illustrato nella figura seguente, per avere un quadro completo dei fenomeni di instabilità si effettuano due diverse analisi, rispettivamente per le scarpate ferroviarie e per i versanti sovrastanti queste ultime.

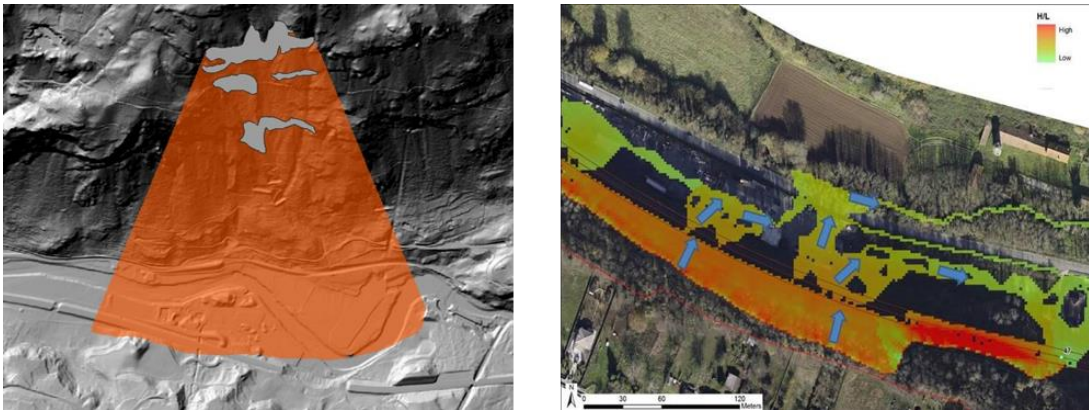


**Figura 4-13: Raccolta dati. In alto a sinistra l'analisi bibliografica, in alto a destra rilievo con Airbone Lidar, in basso a sinistra rilievo mobile mapping, in basso a destra ispezioni in linea (Foria, 2020; Foria, 2021).**

In entrambi i casi, al fine di effettuare l'analisi multicriteria, il tratto di linea ferroviaria indagato è suddiviso in segmenti della lunghezza di 10 metri ciascuno, analizzando separatamente il lato destro da quello sinistro. Gli indici di stabilità sono calcolati tenendo conto dell'effettiva morfologia degli elementi in termini di pendenza e altezza all'interno delle verifiche di stabilità che vengono svolte considerando sia un contesto di frana e scivolamento sia un contesto di crollo.

Per i versanti, caratterizzati da morfologie e geometrie molto variabili, nonché da una distanza variabile dalla linea ferroviaria, è stato utilizzato un approccio differente; questo è basato sul calcolo della possibilità che il materiale mobilizzato sulla scarpata e/o versante possa geometricamente raggiungere la massicciata. Il modello di mobilizzazione impiegato dipende dalla natura del materiale, che sarà differenziato e

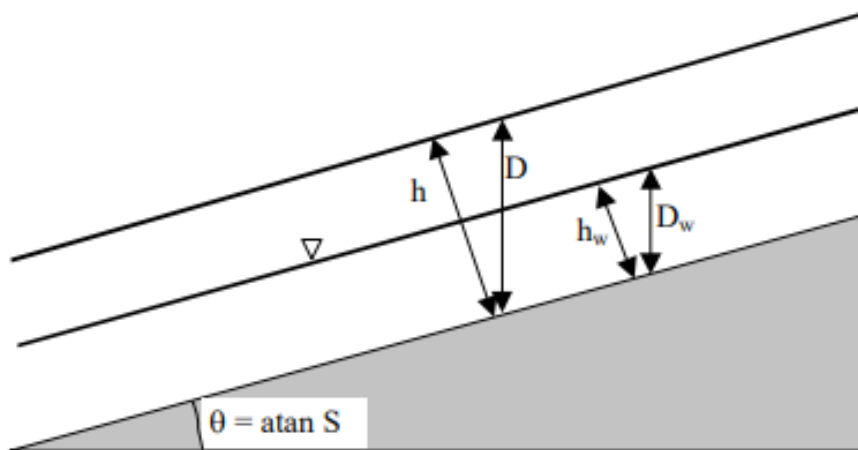
spiegato nel dettaglio di seguito, ovvero geotecnico (terre sciolte o ammassi rocciosi molto fratturati) o geomeccanico (rocce massive o poco fratturate) (Figura 4-14).



**Figura 4-14: Modello di propagazione del materiale mobilizzato per materiali geotecnici (a destra, modello di flusso ad espansione) e materiali geomeccanici (a sinistra, propagazione del cono d'ombra) (Foria, 2021).**

Per i materiali geotecnici (terreni sciolti o ammassi rocciosi molto fratturati), la definizione delle aree sorgente da utilizzare per le simulazioni di runout è effettuata applicando un modello fisicamente basato appositamente sviluppato per applicazioni a carattere regionale (SINMAP), che implementa il calcolo e la mappatura di un “indice di stabilità” basato su informazioni geografiche e geologiche.

La metodologia SINMAP è basata sul metodo della stabilità sul pendio infinito, dove sono contrapposte le forze dovute alla pendenza con le componenti di frizione e coesione su un piano di scivolamento parallelo alla superficie.



**Figura 4-15: Schema del modello di stabilità sul pendio infinito.**

I dati di input per l'utilizzo del SINMAP sono il modello digitale di elevazione, la geologia e i parametri di calibrazione. Il principale output è l'indice di stabilità con il quale si identificano le porzioni di versante più propense al dissesto secondo l'attribuzione ad una delle 6 classi di seguito descritte.

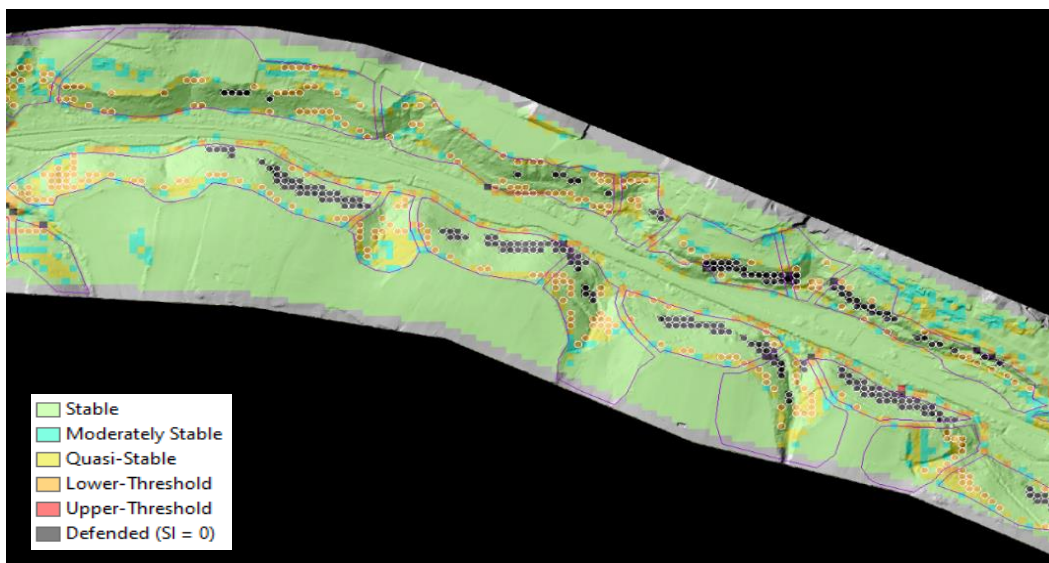
Condition	Class	Predicted State	Parameter Range	Possible Influence of Factors Not Modeled
$SI > 1.5$	1	Stable slope zone	Range cannot model instability	Significant destabilizing factors are required for instability
$1.5 > SI > 1.25$	2	Moderately stable zone	Range cannot model instability	Moderate destabilizing factors are required for instability
$1.25 > SI > 1.0$	3	Quasi-stable slope zone	Range cannot model instability	Minor destabilizing factors could lead to instability
$1.0 > SI > 0.5$	4	Lower threshold slope zone	Pessimistic half of range required for instability	Destabilizing factors are not required for instability
$0.5 > SI > 0.0$	5	Upper threshold slope zone	Optimistic half of range required for stability	Stabilizing factors may be responsible for stability
$0.0 > SI$	6	Defended slope zone	Range cannot model stability	Stabilizing factors are required for stability

**Figura 4-16: Classi di stabilità secondo il modello SINMAP.**

Dal modello di elevazione vengono ricavate le aree di alimentazione di ciascuna cella del DEM e la pendenza. L'area di calibrazione invece rappresenta la suddivisione del territorio in aree con set omogenei di parametri, che nel caso in esame coincide con la suddivisione in classi litologiche eseguita durante il rilievo. I parametri di calibrazione sono dunque l'ID del materiale, il rapporto fra trasmissività e piovosità efficaci (T/R) minimo e massimo, la coesione minima e massima, l'angolo di attrito minimo e massimo, il peso di volume. I valori sono presi da prove di laboratorio disponibili lungo linea.

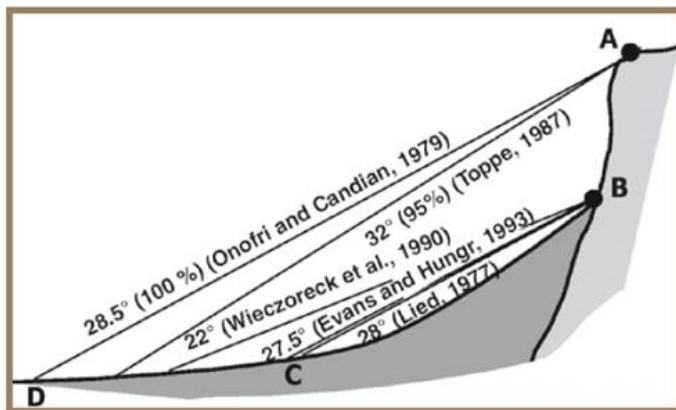
L'indice di stabilità così ottenuto è suddiviso in 6 classi, dove alle ultime 3 (lower threshold, upper threshold, defended) corrisponde indice di stabilità  $< 1$ .

L'assunto da cui si parte è che se una cella non risulta predisposta al dissesto (cioè ha indice di stabilità maggiore o uguale a 1) non è considerata come potenziale area sorgente; pertanto, soltanto le porzioni più critiche di un versante sono prese in considerazione.



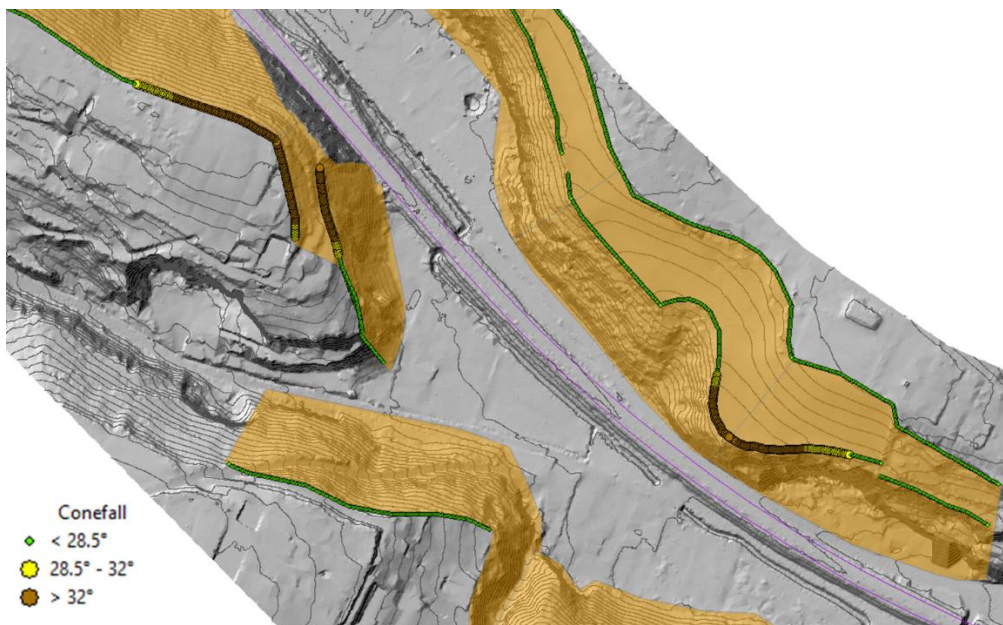
**Figura 4-17: Un tratto della linea con output di SINMAP. Alle celle evidenziate nelle 3 classi inferiori corrisponde un indice di stabilità inferiore a 1.**

Per i materiali geomeccanici (rocce massive o ammassi rocciosi poco fratturati) viene utilizzato un approccio basato sul cosiddetto “cono d’ombra”, definito mediante il valore dell’angolo rispetto all’orizzontale costruito a partire dal limite superiore del pendio. L’angolo serve a stabilire, in modo speditivo ma calibrato su dati reali, se sussistono le condizioni geometriche perché un blocco staccandosi dal versante in un determinato punto possa raggiungere la massicciata. Si tratta di un approccio del tutto preliminare, propedeutico all’effettuazione di simulazioni traiettografiche 2D e 3D in caso di approfondimento. Queste ultime potrebbero essere necessarie già in fasi preliminari, soprattutto nel caso di geometrie di tracciato e della morfologia che si interfacciano in modo articolato tra loro. In questo caso approcci semplificati potrebbero far perdere informazioni nel valutare l’esposizione della linea agli eventi di distacco.



**Figura 4-18: Valori angolari derivanti da analisi in cima o al piede del pendio (Crosta et al., 2001).**

I punti di distacco considerati sono gli orli di scarpata e gli elementi geomorfologici come orli di terrazzo, orli di scarpate fluviali recenti o antiche, testate di strato. Di ciascun punto viene calcolato l'angolo di cono che lo collegherebbe al punto sulla massicciata più vicino. In base al delta di quota fra punto sorgente e limite della massicciata e la distanza da essa: per valori di angolo conefall maggiori o uguali a  $28.5^\circ$ , l'indice di conefall sarà pari a 1; per valori di angolo conefall maggiori o uguali a  $32^\circ$ , l'indice di conefall sarà pari a 2. A ciascuna scarpata è assegnato l'indice di conefall (0, 1, 2) in base all'angolo di conefall massimo.

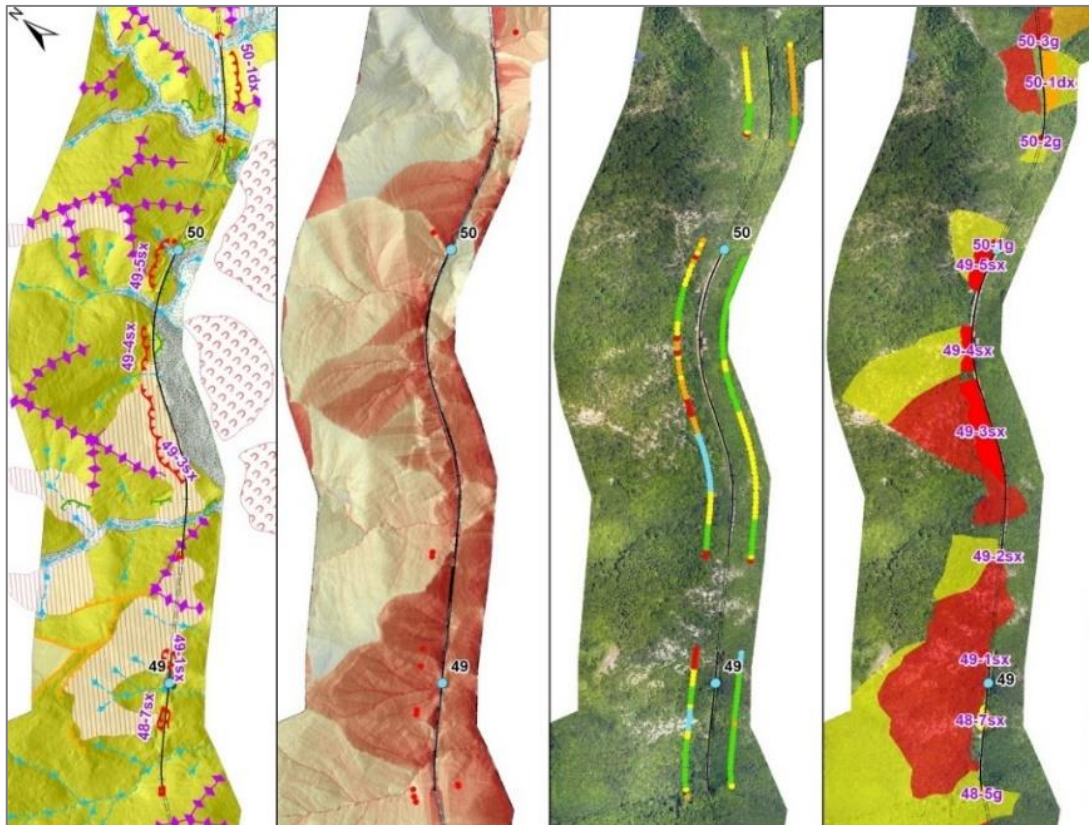


**Figura 4-19: Punti considerati per il calcolo dell'angolo conefall rispetto al limite della massicciata (viola). Nel versante di sinistra è evidente che i punti a "ridosso" della massicciata e messi in cima alla parete rocciosa siano superiori a  $32^\circ$ .**

L'analisi multicriteria combina i risultati delle analisi sopraesposti con gli elementi di vegetazione, idraulici di contorno, distanza dalla linea, etc. ciò permette di ottenere un quadro generale delle problematiche riguardanti la linea, mediante il calcolo di una Priorità che esprime la propensione al dissesto per ciascun tratto elementare di linea rendendo possibile definire un elenco di interventi prioritari e progettare opere di protezione più appropriate.



**Figura 4-20: Stralcio Carta delle Priorità lungo la linea ferroviaria.**



**Figura 4-21: Un esempio di Analisi di Priorità per la gestione dell'infrastruttura ferroviaria. La figura mostra un'applicazione per le frane. Da sinistra a destra: Carta Geomorfologica, Carta dell'Indice di Connettività (i punti rossi indicano il superamento di un valore di soglia), Valore dell'Indice finale, calcolato ogni 10 m lungo la linea, su entrambi i lati, e Carta di Priorità (Foria, 2021b).**

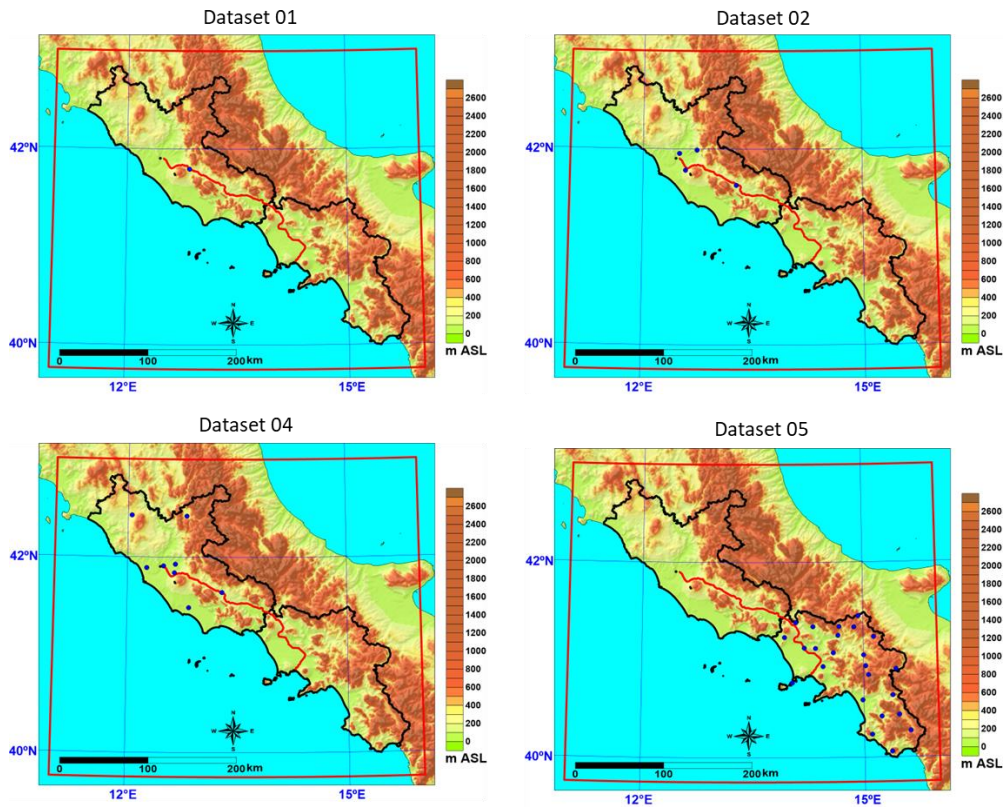
#### 4.2.3 Cambiamento climatico

Per analizzare la vulnerabilità e il rischio al cambiamento climatico, è fondamentale avere dati e modelli che, partendo da scale piccole (nazionale), siano in grado di scendere al dettaglio dell'opera tenendo in conto delle caratteristiche locali del sito (antropiche, microclimatiche, morfologiche).

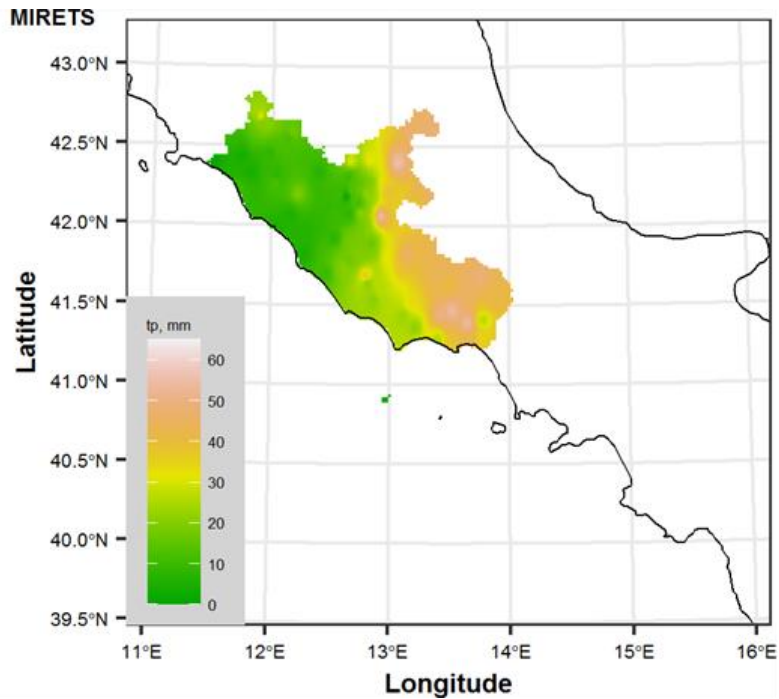
Per tale motivo, i modelli esposti al capitolo precedente, richiedono una procedura di downscaling di tipo statistico per contestualizzarli all'area dell'infrastruttura ferroviaria analizzata. Per fare ciò, sono impiegati i dati di stazioni meteo di varie reti regionali e dati messi a disposizione da strumentazione di ETS. In totale si individuano 14 stazioni per la regione Lazio e 24 per la regione Campania (Figura 4-22). A questo bisogna aggiungere i dati storici meteo-climatici acquistati e messi a disposizione da

ETS, per gli anni dal 2010 al 2020 per le aree analizzate. La procedura di downscaling viene poi verificata con i dati acquisiti in continuo dalle stazioni meteo.

Questo modello di calcolo permette di proiettare i dati per gli scenari futuri di cambiamento meteo-climatico tenendo in conto degli effetti locali. Questa procedura è soggetta a deriva del dato, ma permette una stima verosimile e locale delle variabili in gioco, altresì impossibile con altre procedure.



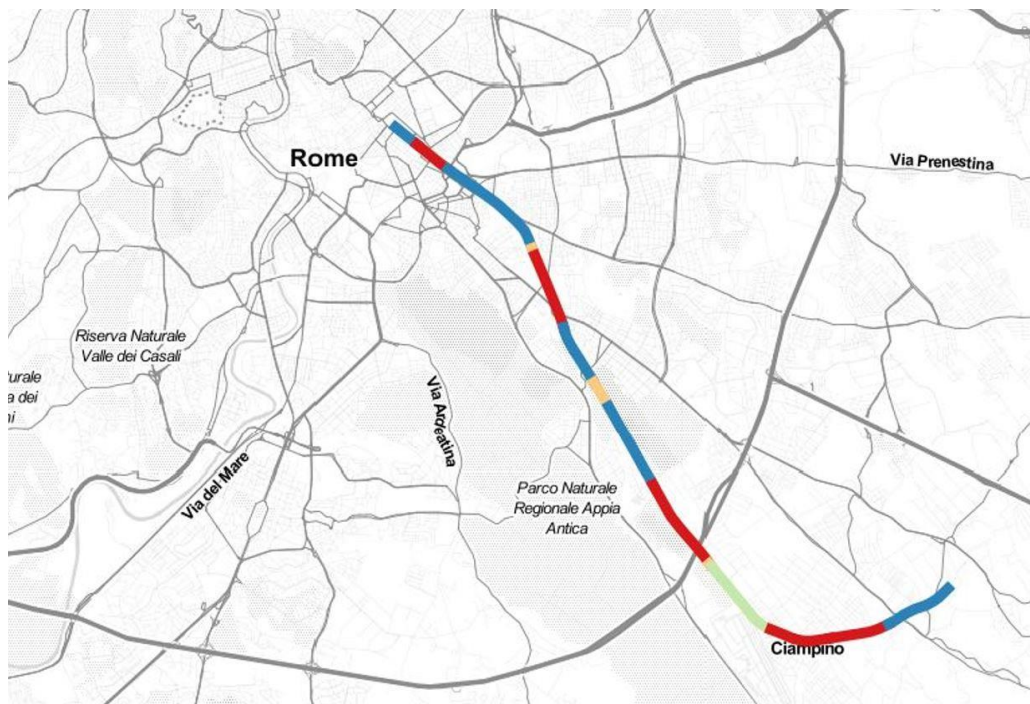
*Figura 4-22: Stazioni meteo impiegate per la validazione dei dati nei diversi domini analizzati tra Lazio e Campania.*



**Figura 4-23: Dati di precipitazione a seguito di downscaling per un periodo (Gennaio, Febbraio 2010) esemplificativo del tempo di validazione (2010 – 2020).**

I valori di tali scenari futuri sono mediati e restituiti in forma di Carta di Priorità, analogamente ai punti precedenti, applicando le variabili meteo-climatiche previste dal modello sull'infrastruttura specifica con i modelli di vulnerabilità ricavati con la procedura descritta al capitolo precedente.

L'applicazione preliminare di tale metodo innovativo è mostrata in Figura 4-24. La visione degli indici di Priorità, permette di visualizzare subito le aree più critiche, classificarle in funzione delle variabili meteo-climatiche singole e/o accorpate e adottare le strategie decisionali per soddisfare l'obiettivo della tassonomia ambientale Europea di mitigazione del rischio al cambiamento climatico grazie al supporto di una procedura quantitativa.



**Figura 4-24:** *Stralcio della Carta delle Priorità media della vulnerabilità al cambiamento climatico per scenari meteo-climatici futuri lungo la linea ferroviaria.*

### 4.3 Applicazione MIRET: focus IA


Nel seguito si illustrano i risultati dell'applicazione di MIRET su una galleria al fine del riconoscimento automatico tramite Intelligenza Artificiale (IA) di anomalie del rivestimento, ovvero la vulnerabilità di superficie della struttura, di una linea stradale nel Lazio. I dati sono sintetizzati allo scopo del presente studio o rappresentativi di campagne di acquisizione svolte. In nessun caso hanno lo scopo o la pretesa di analizzare situazioni reali lungo le aree rappresentate, e sono al solo scopo del presente studio. Per ulteriori approfondimenti fare riferimento alle tesi (Lottini, 2021; De Vita, 2022) e, ove disponibile, pubblicazioni richiamate nel corso del testo.

#### 4.3.1 Digitalizzazione manuale dei difetti dovuti all'acqua


Per una comprensione più dettagliata del metodo di classificazione dei difetti in funzione dell'intensità si riportano di seguito le schede di C5, C6 e C7 estratte dal catalogo difetti implementato (in Figura 4-25, Figura 4-26 e Figura 4-27).

<i>Difetti dovuti alla presenza di acqua</i>		
<b>C5</b>	<b>Macchia di umidità</b>	
<p><b>Definizione:</b> presenza di umidità sulla superficie del cls. Il difetto, generato dal ripetuto passaggio d'acqua sulla superficie dell'elemento interessato, è reso visibile anche dagli effetti dell'azione chimica dei sali in essa disciolti, visibili dalle macchie presenti sul calcestruzzo asciutto.</p>		
Unità di misura: m <sup>2</sup>		
<b>Corrispondenza Cataloghi Committenti</b>		
<b>RFI</b>	<b>Autostrade:</b>	
<i>C4</i>	<i>1-acq</i>	
<b>ITA-AITES</b>	<b>ANAS</b>	
<i>SU-5.</i>	<i>ND</i>	
<b>IQOA-Ministero Manuale ispezione gallerie</b>		<b>Ministero Linee guida ponti</b>
<i>HY-2, HY-4</i>		<i>c.a./c.a.p._1, c.a./c.a.p._2, c.a./c.a.p._3</i>
<b>Valutazione Intensità</b>	<i>0,25</i>	Macchie superficiali di deposito di Sali e cloruri (Piccole variazioni di tonalità del cls)
	<i>0,5</i>	Macchie profonde di deposito di Sali e cloruri (Grandi variazioni di tonalità del cls presenza di muschi)
	<i>0,75</i>	Percolazione importante con deposito (Superficie grondante)
	<i>1</i>	Percolazione importante senza deposito (Superficie grondante)
<b>Valutazione Estensione</b>	<i>0,25</i>	% ( Area tot / Area settore )
	<i>0,5</i>	% ( Area tot / Area settore )
	<i>0,75</i>	% ( Area tot / Area settore )
	<i>1</i>	% ( Area tot / Area settore )

**Figura 4-25: C5 - Macchia d'umidità.**

<i>Difetti dovuti alla presenza di acqua</i>		
<b>C6</b>	<b>Percolazione dai giunti</b>	
<p><b>Definizione:</b> infiltrazione di acqua attraverso i giunti (longitudinali, trasversali, fori iniezione malta, connettori concii). Presenza di umidità o acqua nel cls a seguito di infiltrazione. Il fenomeno si manifesta in presenza di un'impermeabilizzazione imperfetta, se non addirittura assente, in corrispondenza dei giunti costruttivi.</p>		
Unità di misura: m <sup>2</sup>		
<b>Corrispondenza Cataloghi Committenti</b>		
<b>RFI</b>	<b>Autostrade:</b>	
<i>C5, C6</i>	<i>31-acq, 77-G, 111-G</i>	
<b>ITA-AITES</b>	<b>ANAS</b>	
<i>ID-1, WL-2, WL-4</i>	<i>ND</i>	
<b>IQOA-Ministero Manuale ispezione gallerie</b>	<b>Ministero Linee guida ponti</b>	
<i>HY-1, HY-2</i>	<i>c.a./c.a.p._3, Dif. Gen_1</i>	
<b>Valutazione Intensità</b>	<i>0,25</i>	Macchie superficiali di deposito di Sali e cloruri (Piccole variazioni di tonalità del cls)
	<i>0,5</i>	Macchie profonde di deposito di Sali e cloruri (Grandi variazioni di tonalità del cls)
	<i>0,75</i>	Superficie bagnata
	<i>1</i>	Superficie grondante
<b>Valutazione Estensione</b>	<i>0,25</i>	% ( Area tot / Area settore )
	<i>0,5</i>	% ( Area tot / Area settore )
	<i>0,75</i>	% ( Area tot / Area settore )
	<i>1</i>	% ( Area tot / Area settore )

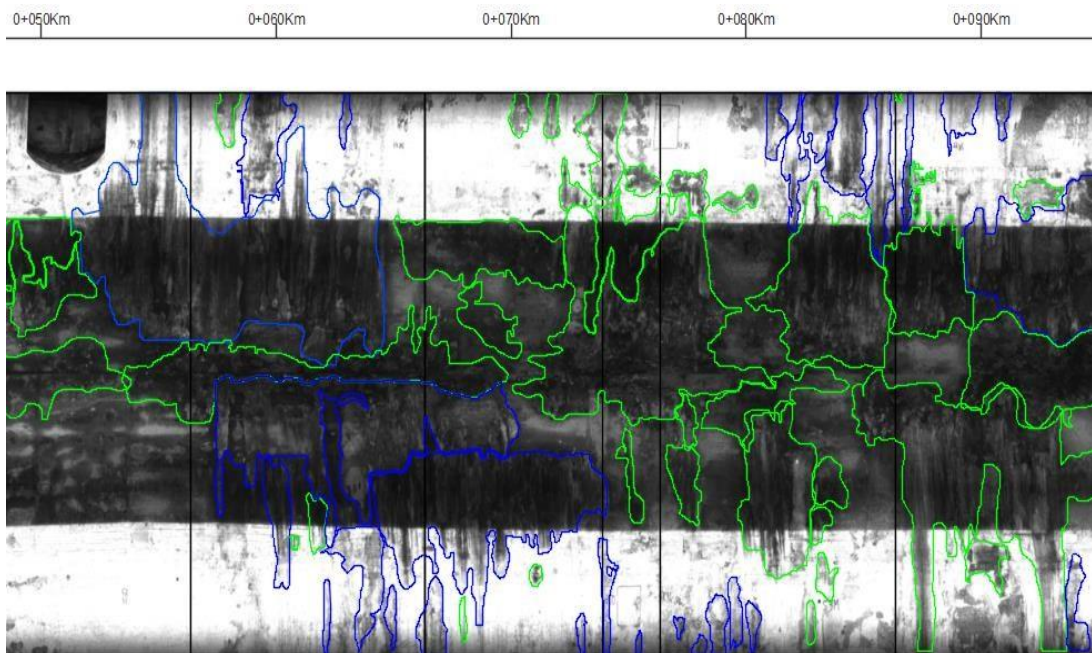
*Figura 4-26: C6 - Percolazione dai giunti.*

<i>Difetti dovuti alla presenza di acqua</i>		
<b>C7</b>	<b>Percolazione dalle fessure</b>	
Definizione: passaggio di acqua attraverso fessure che non comportino un danno alle guarnizioni (gasket), ai connettori, ai fori di iniezioni della malta.		
Unità di misura: m <sup>2</sup>		
Corrispondenza Cataloghi Committenti		
RFI		Autostrade:
C6		31-acq
ITA-AITES		ANAS
WL-3		ND
IQOA-Ministero Manuale ispezione gallerie		Ministero Linee guida ponti
HY-1, HY-2		c.a./c.a.p._3, Dif. Gen_3
Valutazione Intensità	0,25	Macchie superficiali di deposito di Sali e cloruri (Piccole variazioni di tonalità del cls)
	0,5	Percolazione modesta con deposito (Superficie bagnata)
	0,75	Percolazione importante con deposito (Superficie grondante)
	1	Percolazione importante senza deposito (Superficie grondante)
Valutazione Estensione	0,25	% ( Area tot / Area settore )
	0,5	% ( Area tot / Area settore )
	0,75	% ( Area tot / Area settore )
	1	% ( Area tot / Area settore )

**Figura 4-27: C7 - Percolazione dalle fessure.**

L'operazione di digitalizzazione manuale dei difetti ha evidenziato la presenza di più di 190 ammaloramenti originati dall'acqua a cui corrispondono circa 1470m<sup>2</sup> di superficie di rivestimento, si ha così una percentuale di superficie ammalorata rispetto al totale di circa il 49%. Nella Figura 4-28 si riporta una porzione della digitalizzazione manuale, in cui a ciascun difetto è stato assegnato il rispettivo layer che indica la categoria a cui appartiene. Questi difetti sono suddivisi in due categorie: macchie d'umidità (C5) rappresentate in verde e percolazioni (C6) rappresentate in blu, circa il

51% della superficie ammalorata è costituito da macchie di umidità mentre il restante 49% da percolazioni.



***Figura 4-28: Stralcio Porzione dell'esportazione manuale dei difetti.***

Come si può notare dalla figura, il caso studio analizzato in questo lavoro versa in uno stato molto ammalorato, i difetti si presentano con una frequenza elevata e presentano dei contorni di difficile identificazione, essendo diffusi e spesso sovrapposti a prima vista.

Al fine di rendere il processo di analisi più dettagliato e conforme a quanto riportato nelle Linee guida ministeriali l'infrastruttura è stata suddivisa in settori di eguale lunghezza. In particolare, sono stati definiti 8 settori da circa 19 metri ciascuno, in maniera tale che per ogni concio si possano effettuare delle analisi specifiche.

#### *4.3.2 Digitalizzazione automatica dei difetti dovuti all'acqua*

La digitalizzazione manuale dei difetti lungo il rivestimento della galleria è stato un processo oneroso per quanto riguarda i tempi, infatti, per la digitalizzazione completa della galleria sono state impiegate poco meno di due settimane.

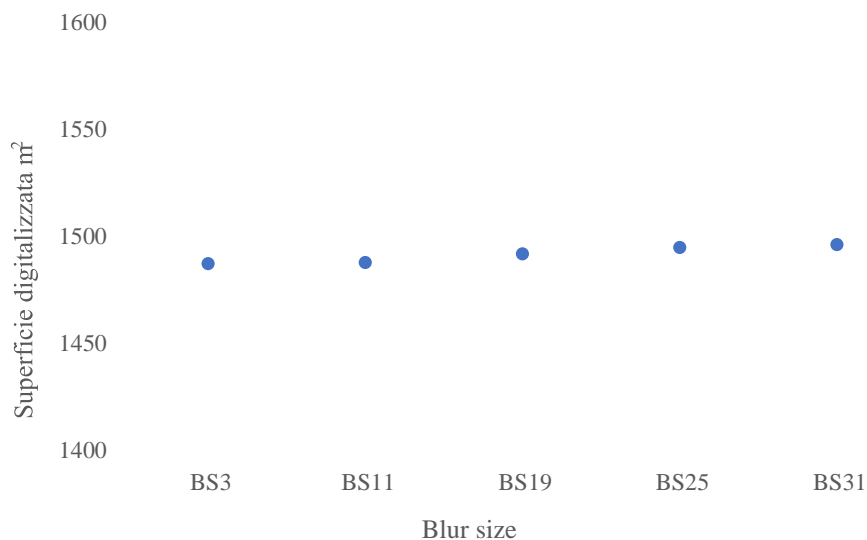
Tramite la digitalizzazione automatica dei difetti si vuole andare a analizzare l'algoritmo sopraesposto nel caso di gallerie in scavo meccanizzato e ne avevano valutato la robustezza. In questo caso si andrà a valutare in una prima fase la prestazione dell'algoritmo in termini di aree digitalizzate e successivamente si faranno

delle considerazioni sull'effettiva utilità dell'algoritmo e su come poterlo utilizzare nel caso di un'ispezione preliminare di una galleria in scavo tradizionale rivestita in calcestruzzo.

L'analisi di sensitività dei parametri threshold e blur size nella prima fase di test serve per capire la sensitività dell'algoritmo al variare dei parametri Threshold e Blur size. La sensitività dell'algoritmo è stata valutata in termini di variazione di superficie riconosciuta come ammalorata.

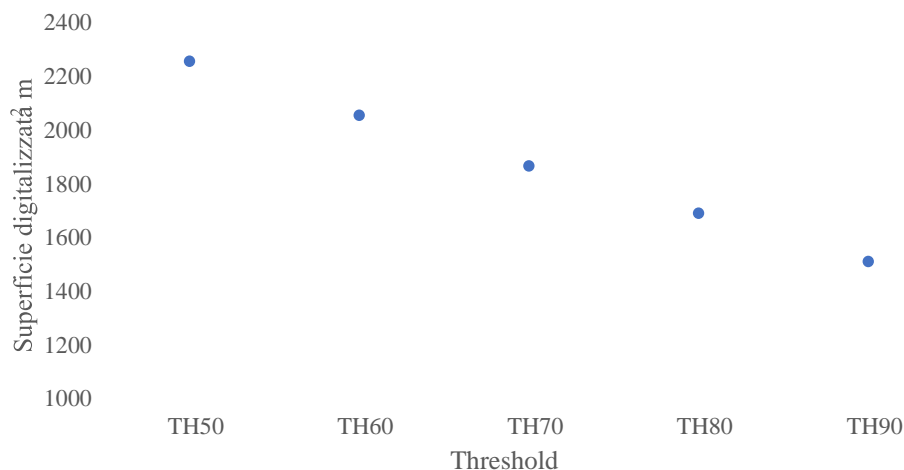
- 5 test con parametro Threshold fisso pari a 90 variando il parametro Blur size sui seguenti valori: 3,11,19,25,31;
- 5 test con parametro Blur size fisso pari a 3 variando il parametro Threshold sui valori: 50,60,70,80,90.

I primi cinque test evidenziano la bassa sensitività del parametro Blur size, come si può notare dalla Figura 4-29, dove la variazione dell'area ammalorata al variare del parametro è pressoché nulla.



**Figura 4-29: Analisi di sensitività del parametro Blur size (Threshold=90).**

I successivi cinque test hanno invece permesso di valutare la sensitività dell'algoritmo rispetto al parametro Threshold mantenendo il Blur size fisso pari al valore 3. Nella Figura 4-30, si può notare come sia presente una correlazione diretta tra la diminuzione dell'area digitalizzata e l'aumento del parametro Threshold.



**Figura 4-30: Analisi di sensitività del parametro Threshold (Blur size=3).**

Da questa analisi si nota come il parametro che influenza maggiormente il risultato finale sia il valore di Threshold. Si ritiene che il valore di Blur size abbia poca rilevanza e pertanto nelle prossime analisi sarà mantenuto sul valore fisso pari a 3, ovvero il minimo. I risultati sono coerenti con quanto ci si potesse aspettare date le definizioni dei parametri.

#### 4.3.3 Manuale vs. automatico

Il primo metodo di valutazione dell'algoritmo di Intelligenza Artificiale è stato quello di confrontare il totale delle aree digitalizzate settore per settore con quelle della digitalizzazione manuale. Il confronto viene effettuato tra le seguenti digitalizzazioni:

- 5 digitalizzazioni automatiche con Threshold pari a 70, 80, 90, 100, 110;
- Digitalizzazione manuale.

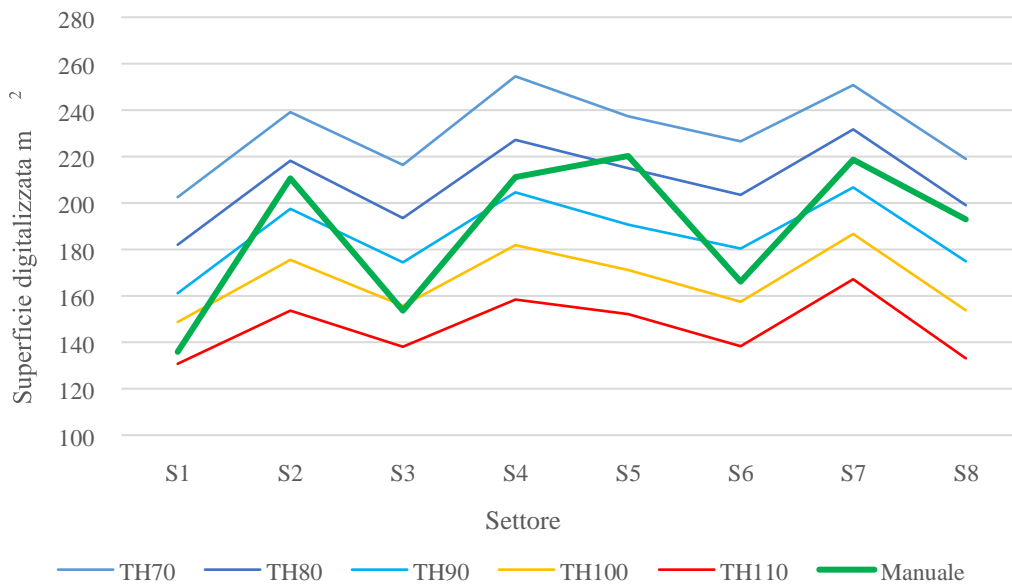
Attraverso l'esportazione in ambiente CAD la superficie della galleria è stata suddivisa in 8 settori di egual lunghezza (circa 19m). Successivamente è stato assegnato un layer a ciascun settore di ogni digitalizzazione automatica testata per un totale di 40 layer, sono stati poi creati altri 8 layer per la digitalizzazione manuale avendo cura di spezzare le polilinee nel momento in cui una porzione di un difetto si trovasse tra due settori differenti.

Avendo ormai compreso che il parametro Blur size ha una sensitività modesta ai fini del risultato finale, che in questo caso è rappresentato dalla somma delle aree ammalorate, si è deciso di tenerlo fisso sul valore minimo pari a 3.

Nella Figura 4-31 e Tabella 4-1 vengono riassunti i risultati.

**Tabella 4-1: Superficie difetti (% rispetto alla manuale), si riportano le aree ammalorate rilevate tramite il WaterSegNet e nell'ultima colonna quelle relative alla digitalizzazione manuale suddivise per settori.**

BS=3	TH70	TH80	TH90	TH100	TH110	Manuale
S1	149%	134%	119%	109%	96%	100%
S2	114%	104%	94%	83%	73%	100%
S3	141%	126%	114%	101%	90%	100%
S4	121%	108%	97%	86%	75%	100%
S5	108%	98%	87%	78%	69%	100%
S6	136%	123%	109%	95%	83%	100%
S7	115%	106%	95%	85%	76%	100%
S8	113%	103%	91%	80%	69%	100%



**Figura 4-31: Rappresentazioni per settori della superficie dei difetti AI e Manuali ( $m^2$ ).**

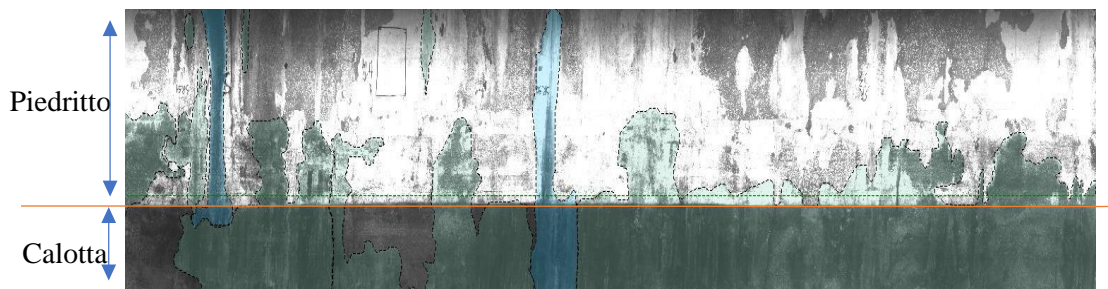
Come si evince dalla Figura 4-31 non si può identificare nessun valore di soglia che approssimi il risultato fornito dalla digitalizzazione manuale. Esistono valori di Threshold che per alcuni settori rilevano la stessa superficie ammalorata che viene digitalizzata manualmente, ma è altrettanto vero che questi stessi valori di Threshold

commettono errori grossolani negli altri settori, rendendo impossibile l'utilizzo di un solo valore del parametro di soglia per l'intera galleria. A parte per il settore 5, il trend viene comunque rilevato da tutti i valori testati.

Inoltre, se si analizzano visivamente le due digitalizzazioni (Figura 4-32 e Figura 4-33) si può facilmente notare come l'algoritmo di Intelligenza Artificiale sovrastimi l'area ammalorata in prossimità delle zone dei piedritti. Questo potrebbe essere dovuto alla differenza di colorazione tra calotta e piedritti, tipica delle gallerie stradali. Di norma le gallerie stradali devono essere verniciate di bianco da 0m a 4m dal piano viabile, la parte della calotta invece assume la classica colorazione scura a causa delle polveri e dello smog che viene accumulato. Nelle seguenti immagini viene rappresentata una porzione della galleria (piedritti di altezza 4m con sfondo chiaro), dove la linea arancione identifica la separazione tra piedritti e calotta.



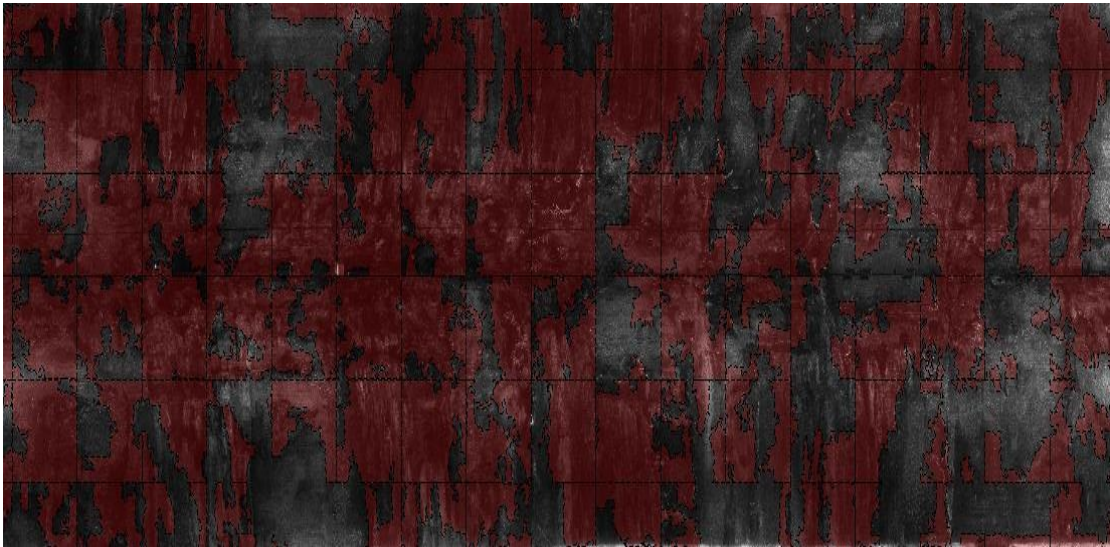
**Figura 4-32: Digitalizzazione di una porzione del piedritto destro della galleria in esame (Threshold=90, Blur size=3).**



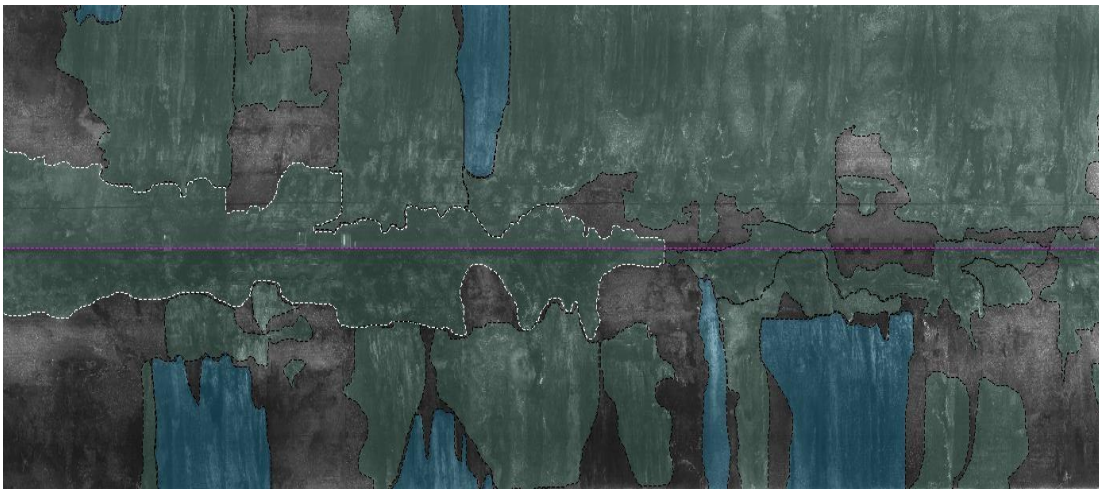
**Figura 4-33: Digitalizzazione manuale di una porzione del piedritto destro della galleria in esame.**

Dalle due immagini precedenti si nota come l'algoritmo riesca a rilevare abbastanza grossolanamente le macchie dovute alle percolazioni e all'umidità. Inoltre, vengono considerati molti difetti non derivanti dalla presenza di acqua, come la moltitudine di distacchi presenti sul rivestimento della galleria. Per quanto riguarda la calotta invece, nelle immagini (Figura 4-34 e Figura 4-35) si può notare come l'algoritmo digitalizzi un'area leggermente inferiore rispetto alla manuale, questo è correlato all'utilizzo di

un valore di Threshold troppo basso che non consente di individuare la totalità dei difetti.



**Figura 4-34: Digitalizzazione automatica di una porzione di calotta (Threshold=90, Blur size=3)**



**Figura 4-35: Digitalizzazione manuale di una porzione di calotta.**

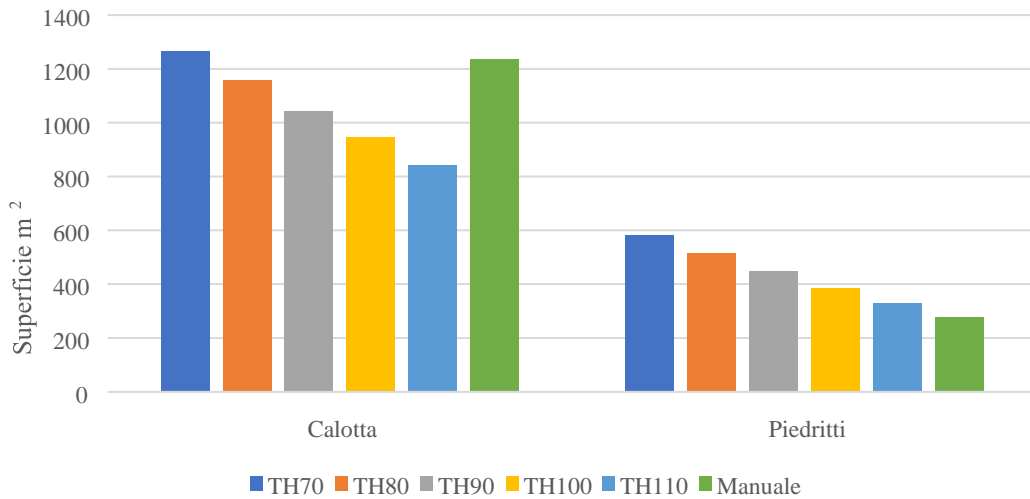
Per completezza viene adesso riportato un confronto in cui, anziché suddividere il tunnel in settori vengono considerate le aree digitalizzate dividendo la galleria in piedritti e calotta, testando ancora una volta i risultati in termini di aree identificate differenziando il parametro Threshold. Con l'ausilio di programma di disegno digitale si va a definire, per ogni valore di Threshold, un layer specifico per tutte le polilinee chiuse presenti sui piedritti e un layer per quelle presenti in calotta, successivamente con il comando *estrai dati* si esportano in un file Excel i dati relativi alle aree totali.

La Figura 4-36 e la Tabella 4-2 riassumono i risultati ricavati da questa analisi.

**Tabella 4-2: Differenza in termini di superficie (%) tra calotta e piedritti confrontate con la digitalizzazione manuale.**

BS=3	TH70	TH80	TH90	TH100	TH110	Manuale
Calotta	102%	94%	85%	77%	68%	100%
Piedritti	206%	181%	158%	136%	116%	100%

Dovendo scegliere un valore fisso di Threshold, saremmo portati a scegliere un valore compreso tra 80 e 100 circa, tuttavia dalla Figura 4-36 si evince che questi valori sovrastimerebbero la reale superficie ammalorata per i piedritti e al contrario sottostimerebbero la superficie ammalorata in calotta.



**Figura 4-36: Rappresentazione grafica delle superfici totali digitalizzate sui piedritti e in calotta.**

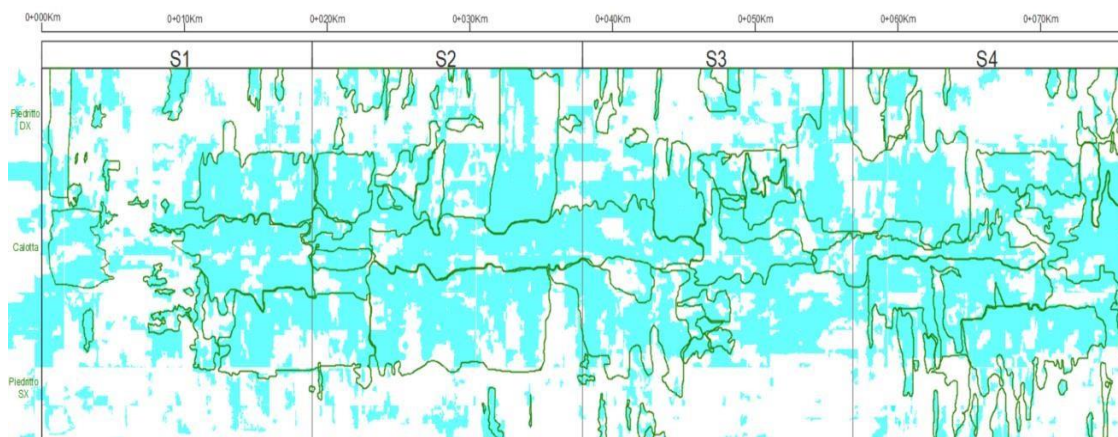
Da queste analisi appare una criticità non trascurabile, rappresentata dalla scarsa capacità di analizzare correttamente le aree ammalorate tramite l'utilizzo di un solo valore di Threshold per tutta la superficie della galleria. I test effettuati suddividendo la galleria in piedritti e calotta ci suggeriscono di utilizzare dei valori di Threshold differenti per queste due aree strutturali. In particolare, un valore compreso tra 70 e 80 in calotta e maggiore di 110 per i piedritti.

Al fine di individuare le cause che hanno prodotto le prestazioni discusse precedentemente, in questo paragrafo si riportano gli otto settori facendo un confronto qualitativo tra le digitalizzazioni generate con il metodo di diagnostica manuale dei difetti e quelle prodotte applicando l’algoritmo di Intelligenza Artificiale.

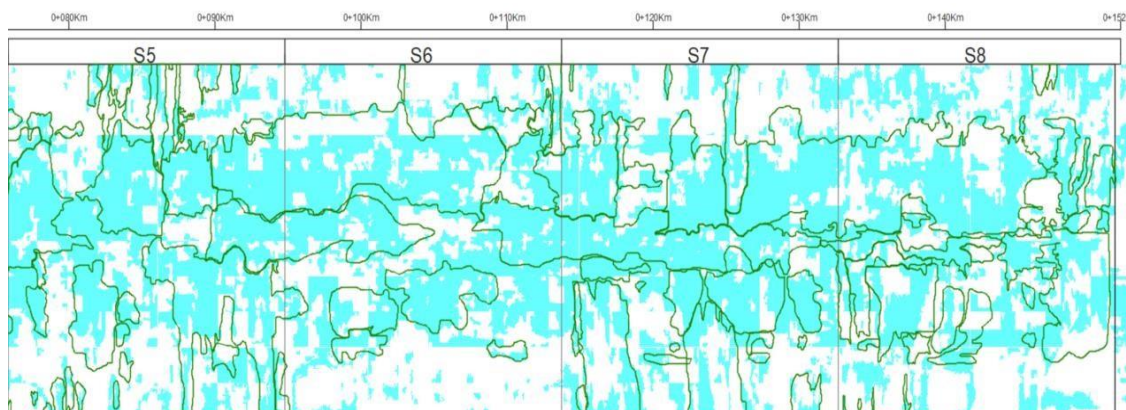
Si utilizzano i valori di Threshold che meglio hanno saputo approssimare l’area totale sia nei piedritti che in calotta:

- Calotta: *Threshold=75*;
- Piedritti: *Threshold=120*.

Vengono riportati tutti i settori suddivisi in piedritti e calotta. Il contorno delle digitalizzazioni prodotte dal metodo manuale viene riportato con il colore verde, mentre le digitalizzazioni effettuate tramite il metodo automatico sono rappresentate tramite una maschera color ciano.



**Figura 4-37: Manuale vs automatico per i Settori 1-2-3-4 della galleria.**



**Figura 4-38: Manuale vs. automatico per i Settori 5-6-7-8 della galleria.**

Queste immagini ci mostrano che sia nei piedritti che in calotta l’algoritmo digitalizza un numero maggiore di difetti ma con area minore. In calotta spesso il

difetto digitalizzato automaticamente presenta dei vuoti all'interno, queste aree rappresentano falsi negativi che però si vanno a bilanciare con la grande quantità di falsi positivi presenti, rendendo il confronto in termini di aree equilibrato. Allo stesso modo nei piedritti il difetto manuale viene digitalizzato solo in parte e di contro sono presenti molti falsi positivi che spesso rappresentano distacchi.

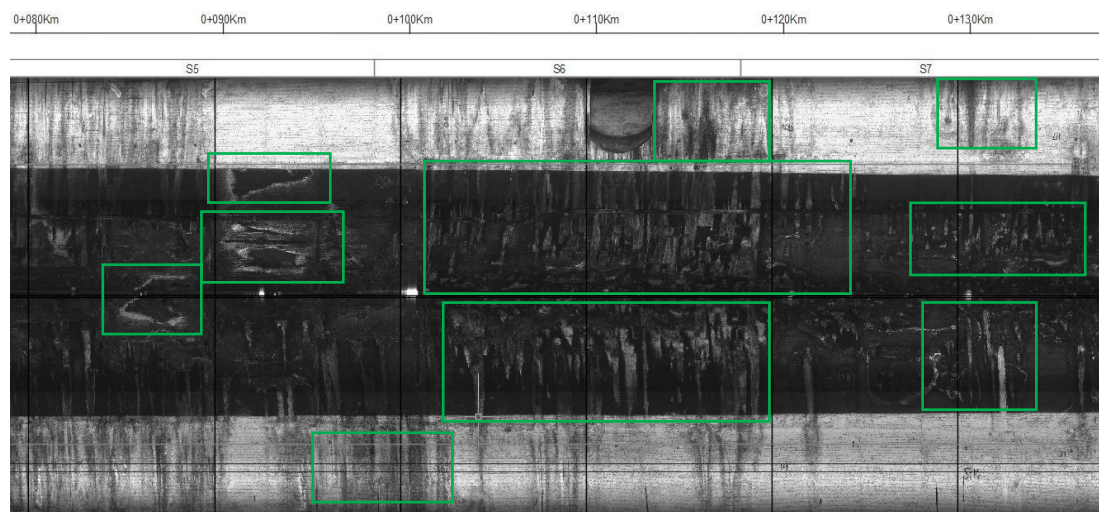
È proprio per queste problematiche che il confronto in termini di aree digitalizzate appare fuorviante. La metodologia che prevede l'analisi distinta di piedritti e calotta, seppur apparentemente con una maggiore precisione rispetto alle classiche analisi non fornisce una digitalizzazione precisa in termini di localizzazione del difetto sul rivestimento, ma si limita a riportare una stima corretta dell'area ammalorata totale di ciascun settore. Tramite questa metodologia, seppur con non poche imprecisioni, si riesce a porre rimedio alla criticità che è stata individuata all'inizio del percorso di analisi. È stato constatato che usare lo stesso valore di Threshold per calotta e piedritti porta ad un inevitabile comparsa di falsi positivi (soprattutto nei piedritti) e di falsi negativi (soprattutto in calotta) a causa delle caratteristiche diverse delle due zone strutturali. Con la separazione dell'algoritmo ci si può avvalere di un unico valore di Threshold per tutti i settori. È altrettanto vero che l'algoritmo rimane ancora impreciso, come evidenziato dal confronto qualitativo, questo tipo di imprecisione deve però necessariamente essere contestualizzata in base alle finalità per le quali si utilizza un metodo automatico di riconoscimento difettologico per scopi di monitoraggio e diagnostici.

L'algoritmo non può essere impiegato in un'analisi approfondita dello stato di ammaloramento di una galleria; tuttavia, può essere un valido strumento nel caso in cui venga usato al fine di valutazioni preliminari in cui si considera accettabile un certo tasso di incertezza nei risultati. L'algoritmo se implementato all'interno di un software, riesce a restituire una panoramica della condizione dei vari settori della galleria in maniera corretta, a patto che all'interno del software sia presente una specifica tecnica che permetta di suddividere la galleria in piedritti e calotta e di effettuare due analisi distinte.

#### 4.3.4 Estensione ad un'altra galleria di linea

In questo paragrafo vengono eseguite le stesse analisi effettuate nei capitoli precedenti, su una galleria diversa della stessa rete stradale. L'obiettivo è quello di testare la robustezza e l'affidabilità del nuovo metodo di analisi proposto.

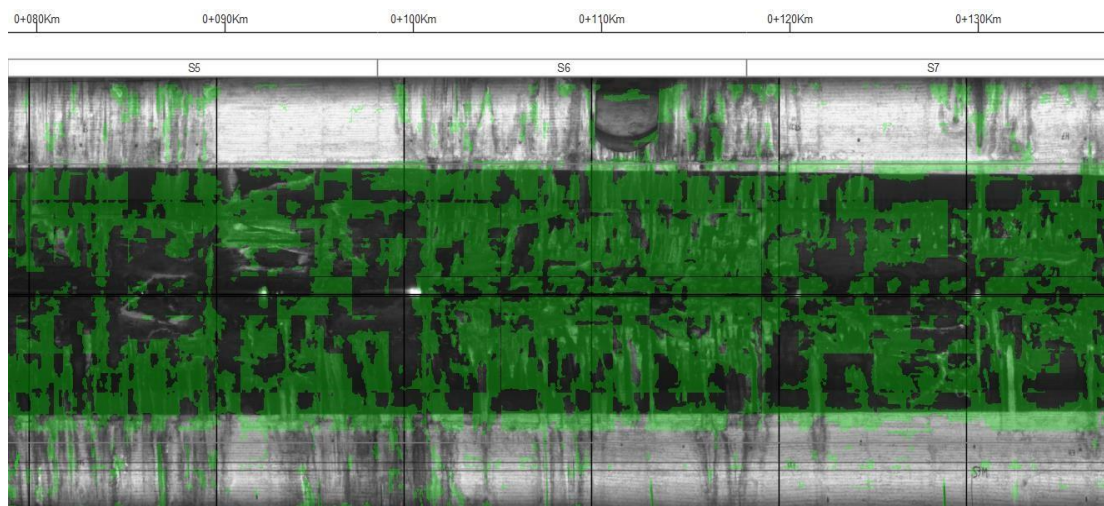
La galleria che si prende in considerazione appartiene alla stessa linea del precedente caso studio, anche in questo caso lo scavo è stato effettuato secondo il metodo tradizionale e anch'essa è rivestita in calcestruzzo. La galleria è alta circa 21m, lunga circa 255m ed è stata suddivisa in 13 settori di lunghezza circa uguale a 19.5m. In Figura 4-39, l'immagine di alcuni settori della galleria



**Figura 4-39: Inquadratura fotografica dei settori 5-6-7 di un'altra galleria della stessa linea stradale.**

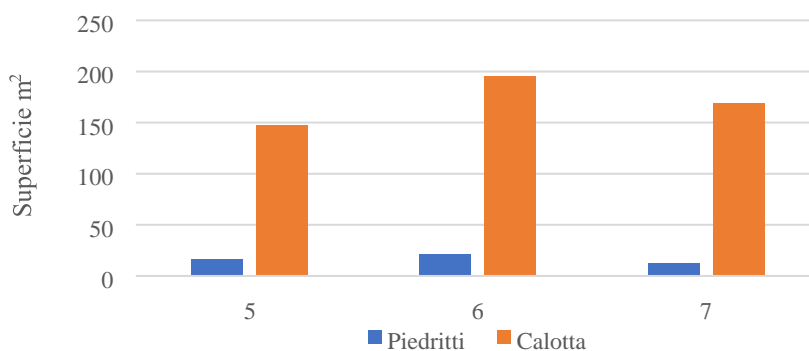
Considerando la Figura 4-39, si prevede che nel settore 6 sia presente una regione estesa con una densità di ammaloramento elevata rispetto ai settori 5 e 7 che appaiono meno degradati, in cui si prospettano ammaloramenti modesti.

Inizialmente, si effettua un'analisi automatica in cui viene usato lo stesso valore per il parametro Threshold che è risultato ottimale precedentemente. Dunque, il valore usato per l'analisi della calotta è 75 mentre quello usato per i piedritti 120. Nella Figura 57 viene riportato il risultato della digitalizzazione esportato in programma di disegno digitale per gli stessi settori 5-6-7.



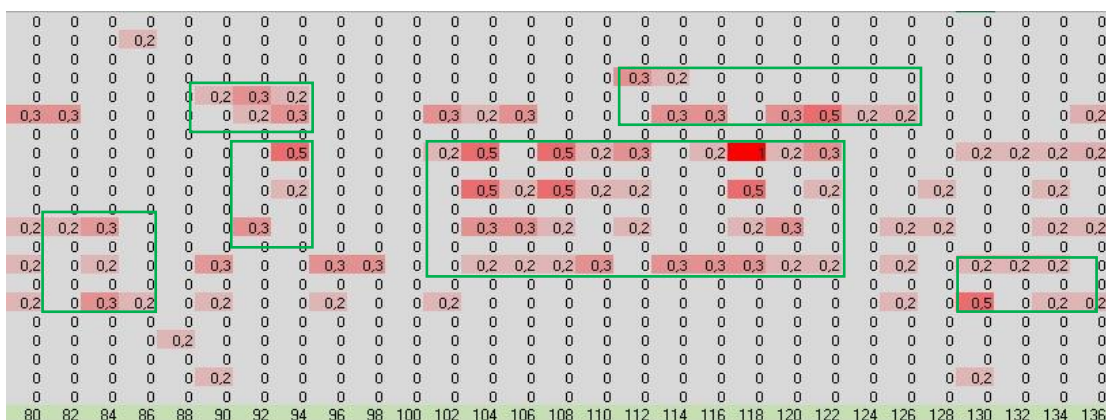
**Figura 4-40: Digitalizzazione automatica dei settori 5-6-7, Threshold=75 in calotta e Threshold=120 per i piedritti.**

Dall'analisi si nota come in questo caso un valore di Threshold pari a 120 pare essere troppo elevato per i piedritti, in quanto le aree digitalizzate non rispecchiano il reale ammaloramento. Tuttavia, l'indicazione che si ottiene considerando la somma delle aree ammalorate nei diversi settori sembra confermare le aspettative in quanto il settore 6 risulta maggiormente ammalorato rispetto agli altri due (Figura 4-40 e Figura 4-41).



**Figura 4-41: Istogramma in cui viene riportata la somma delle aree ammalorate nei settori 5-6-7.**

Per quanto riguarda la mappatura della densità degli ammaloramenti, prendendo come riferimento la Figura 4-39 ci si aspetta che nel settore 5 siano presenti alcuni ammaloramenti puntuali nelle vicinanze della chilometrica 90 e che successivamente sia presente una regione con una densità di ammaloramento maggiore per tutto il settore 6.



**Figura 4-42: Mappatura dei settori 5-6-7 tramite valore di Threshold pari a 220.**

Dalla Figura 4-42 si può notare come siano state rispettate le previsioni basate su un riconoscimento manuale in Figura 4-39. La mappatura mostra infatti un’ampia zona con una densità di ammaloramento elevata nel settore 6 e degli ammaloramenti più modesti negli altri settori.

#### 4.3.5 Approfondimenti puntuali

Alla luce delle considerazioni fatte nel capitolo precedente, vengono effettuati alcuni approfondimenti e test utili a comprendere le funzioni dell’algoritmo.

Il primo aspetto riguarda se la digitalizzazione mediante l’utilizzo di valori differenti di Threshold per piedritti e calotta possa portare all’individuazione di due valori di Threshold che approssimino correttamente l’area totale e possano quindi sostituire la digitalizzazione manuale.

Sono stati effettuati i seguenti test:

- 3 test per la calotta con *Threshold* pari a 80,75 e 70;
- 7 test per i piedritti con *Threshold* pari a 160,150,140,130,125,120 e 115.

Tramite la funzione export in programma di disegno digitale si esportano tutte le digitalizzazioni e si dividono in settori. Infine, tramite l’estrazione dati si ottengono i risultati seguenti.

I primi tre test sulla calotta indicano che il parametro di Threshold che meglio riesce a rilevare un’area totale di difetti settore per settore più simile a quella manuale è il valore 75, in quanto presenta una media di area digitalizzata di circa il 100%. Di seguito è riportata la Tabella 4-3 con le percentuali di area digitalizzata in calotta rispetto alla manuale.

**Tabella 4-3: Confronto digitalizzazione manuale e automatica in calotta.**

TH	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Media
80	108%	90%	112%	86%	88%	119%	93%	73%	96%
75	114%	93%	119%	89%	92%	127%	97%	76%	100%
70	120%	96%	125%	93%	96%	131%	100%	81%	102%

Per quanto riguarda i piedritti, invece, dalla Tabella 4-4 il valore di Threshold, che sembra comportarsi meglio se messo a confronto con la digitalizzazione manuale è il valore 120.

**Tabella 4-4: Confronto digitalizzazione manuale e automatica sui piedritti.**

TH	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	Media
160	65%	51%	51%	33%	39%	36%	53%	97%	52%
150	82%	62%	63%	42%	49%	46%	63%	115%	63%
140	99%	73%	76%	51%	55%	59%	73%	130%	74%
130	125%	84%	92%	61%	64%	73%	83%	148%	88%
125	137%	90%	101%	68%	70%	83%	88%	160%	94%
120	145%	96%	109%	73%	74%	101%	90%	170%	104%
115	162%	101%	119%	79%	80%	102%	99%	184%	111%

I risultati mostrano che i due valori di Threshold selezionati approssimano correttamente l'area *totale* ammalorata sia sui piedritti che in calotta, con una differenza di pochi punti percentuali rispetto all'area totale manuale. Se invece si considera la prestazione dell'algoritmo sui singoli settori notiamo che per quanto riguarda la calotta i risultati presentano percentuali molto vicine al 100%, tuttavia il risultato è differente per i piedritti. Nel primo e nell'ultimo settore l'algoritmo sovrastima molto la superficie dei difetti, ma il problema sembra limitato solamente a questi due settori. Questa problematica potrebbe essere causata dal fatto che durante la digitalizzazione manuale sia stato usato un metodo di giudizio diverso oppure che

questi settori presentino tipologie di difetti che vengono riconosciute come difetti causati dall'acqua ma che in realtà non lo sono.

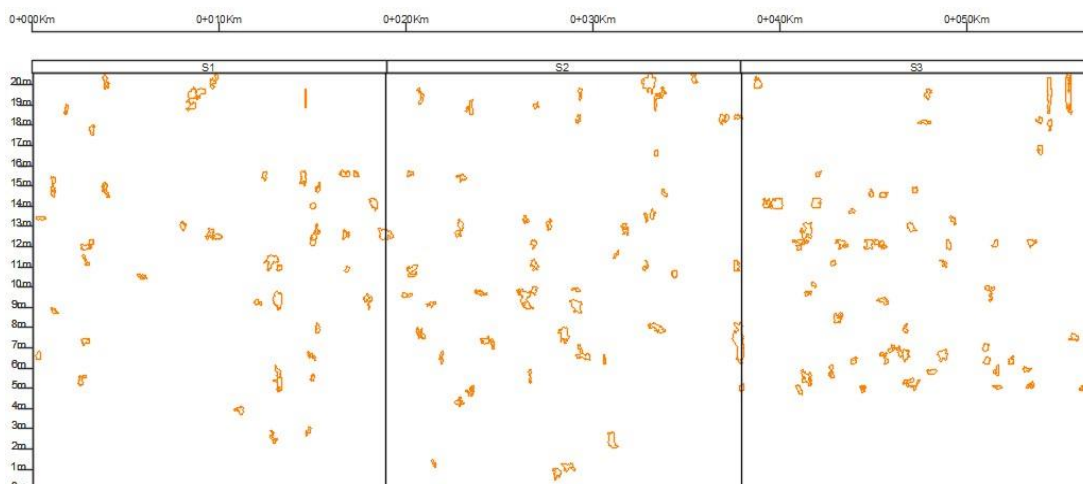
Tramite questo tipo di analisi, i risultati ottenuti dall'algoritmo di AI appaiono più concordi con quelli della digitalizzazione manuale, infatti quasi in ogni settore e in ogni area strutturale è stata digitalizzata un'area molto simile a quella digitalizzata manualmente, tuttavia rimangono alcune criticità.

In una tipologia di test in cui si effettua un confronto tra le aree non si dà importanza all'effettiva individuazione della localizzazione degli ammaloramenti sul rivestimento della galleria; pertanto, la congruenza tra la superficie prodotta dal modello e quella manuale di riferimento può essere presente anche se l'algoritmo considera come difetto una porzione di rivestimento diversa da quella effettivamente ammalorata ed allo stesso tempo non ne individua altre soggette ad ammaloramenti reali.

Altro aspetto volge lo sguardo verso alcune criticità delle modalità di analisi effettuate nel paragrafo precedente:

- La veridicità delle analisi è fortemente legata al parametro di Threshold utilizzato, abbiamo visto infatti come spesso nei piedritti sia necessario diminuire il valore di soglia per evitare la comparsa di molteplici falsi positivi;
- La determinazione della linea separatrice tra piedritti e calotta nelle analisi precedenti è stata inserita ad una quota fissa per semplicità di calcolo, ma in molti casi sono presenti oscillazioni nella quota di separazione delle due zone strutturali;
- Il risultato che otteniamo in termini di area totale digitalizzata non può considerarsi affidabile, bensì è da considerarsi come un mero indicatore dei settori più ammalorati.

Alla luce di queste considerazioni si propone una modalità di applicazione e interpretazione dei risultati dell'algoritmo di Intelligenza Artificiale differente, un'analisi slegata dal valore di Threshold senza l'esigenza di suddividere la galleria in piedritti e calotta. L'analisi viene condotta utilizzando un parametro Threshold molto elevato così da digitalizzare solo le porzioni di rivestimento a cui l'algoritmo assegna una probabilità alta di costituire un difetto. Il risultato generato è rappresentato da un insieme di difetti con un'area generalmente di circa  $0,2\text{m}^2$ . In questo modo si limita, per quanto possibile, la comparsa di falsi positivi. In Figura 4-43 vengono raffigurate le esportazioni su programma di disegno digitale dei Settori 1-2-3 a titolo d'esempio.

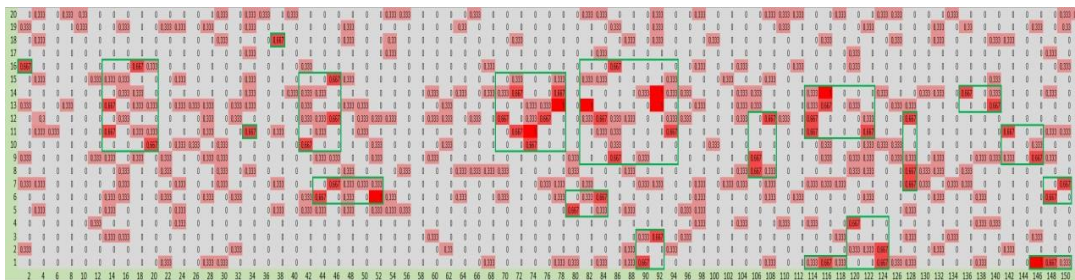


**Figura 4-43: Settori 1-2-3 digitalizzati mediante valore di Threshold pari a 220.**

Dalla Figura 4-43 in cui i settori 1-2-3 sono stati analizzati con un valore di Threshold pari a 220 è facile constatare la diversa distribuzione dei difetti, l'area maggiormente ammalorata risulta essere la calotta. In questo paragrafo si ricerca un metodo analisi e interpretazione dei risultati che renda possibile localizzare agevolmente le aree maggiormente ammalorate.

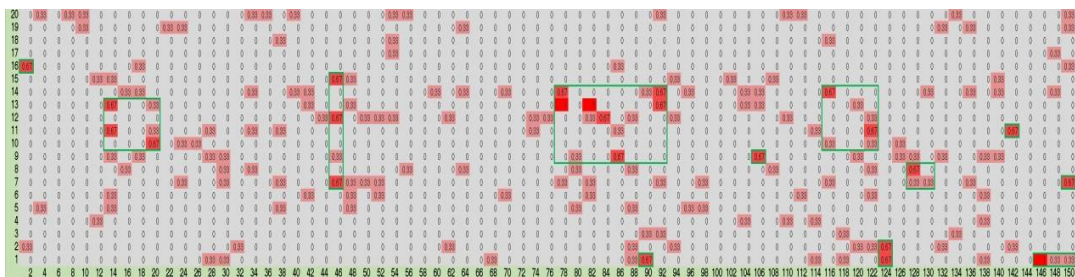
I diversi settori sono stati suddivisi in griglie di dimensioni  $2m \times 1m$  al cui interno è stata "quantificata" la densità dei difetti riscontrati. Se il valore all'interno di ogni cella rappresenta il numero di difetti presenti all'interno della cella stessa, si possono considerare questi valori come indicatori dell'intensità di ammaloramento. È infatti ragionevole pensare che più difetti si trovino in una stessa area più intenso sia l'ammaloramento di quella porzione di rivestimento, in quanto l'algoritmo in cui viene impostato un livello di soglia molto elevato digitalizza solo difetti con area molto ridotta, ed è quindi la loro concentrazione a determinarne l'intensità.

In Figura 4-44, si riporta la griglia ricavata usando valore di Threshold pari a 220 in cui vengono evidenziate in verde le zone maggiormente ammalorate. I valori sono normalizzati rispetto al valore maggiore riscontrato lungo l'intera griglia. Mediante la formattazione condizionale sono state evidenziate in rosso le celle con una maggiore densità di ammaloramento. Questa rappresentazione fornisce dunque un'indicazione sulla distribuzione degli ammaloramenti e rende possibile stabilire la posizione delle aree maggiormente ammalorate. Questo tipo di analisi non necessita quindi della suddivisione della galleria in piedritti e calotta.



**Figura 4-44: Mappatura della densità degli ammaloramenti effettuata con valore di Threshold pari a 220.**

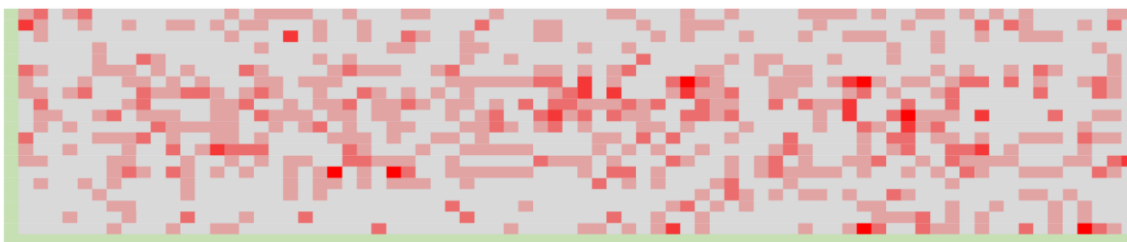
L'elemento chiave di questo tipo di analisi è rappresentato dal fatto che si identificano le medesime regioni ammalorate utilizzando valori di Threshold univoci, a patto che essi siano sufficientemente alti da far sì che l'algoritmo non digitalizzi un numero elevato di falsi positivi. Inoltre, è fondamentale che il valore di Threshold non sia troppo elevato in quanto si necessita della digitalizzazione di una quantità ragionevole di difetti che conferiscano robustezza all'analisi. Nella Figura 4-45 si riporta la mappatura effettuata tramite il parametro Threshold pari a 230.



**Figura 4-45: Mappatura della densità degli ammaloramenti effettuata con valore di Threshold pari a 230.**

Dall'immagine si può notare come le regioni con densità di ammaloramento elevate possiedano un'estensione minore rispetto a quelle mappate con il parametro Threshold pari a 220. Questo è dovuto al fatto che aumentando il valore di Threshold diminuisce il numero totale dei pixel considerati come difetto. Tuttavia, è la posizione di queste regioni che fornisce l'informazione desiderata e che induce l'operatore a porre l'attenzione sulle medesime aree selezionate tramite la mappatura precedente.

Il valore di Threshold pari a 210 invece viene identificato come valore di Threshold minimo utile in un'analisi di questo tipo, in quanto una mappatura con valori minori risulta essere poco chiara a causa dall'elevato numero di difetti (Figura 4-46), sebbene si riesca ancora a riconoscere le aree maggiormente ammalorate.



**Figura 4-46: Mappatura con valore di Threshold pari a 210 .**

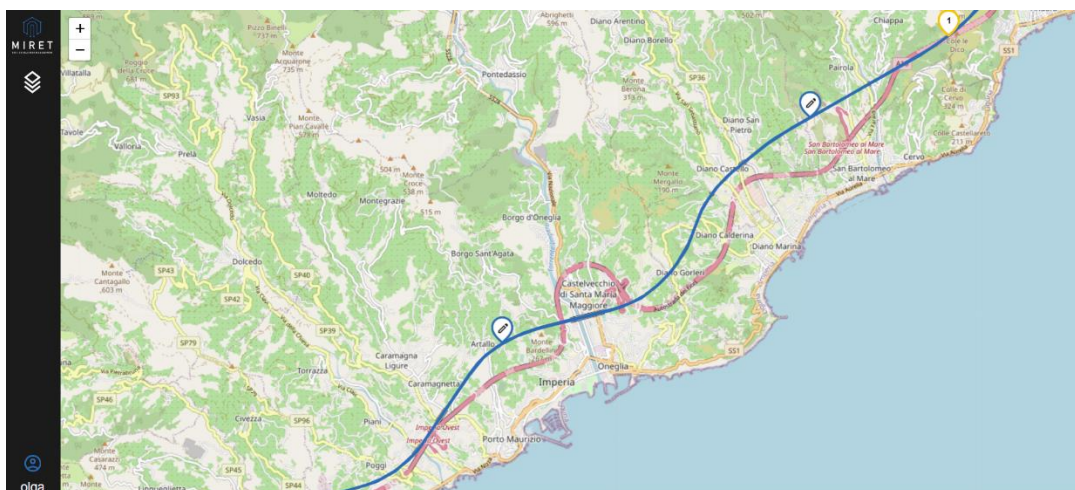
Con questo approccio “empirico”, è possibile dunque svincolarsi dalla sensitività del parametro Threshold a patto di avere come obiettivo l’identificazione solo qualitativa delle aree che richiedono maggior attenzione.

#### **4.4 Piattaforma e integrazione dati**

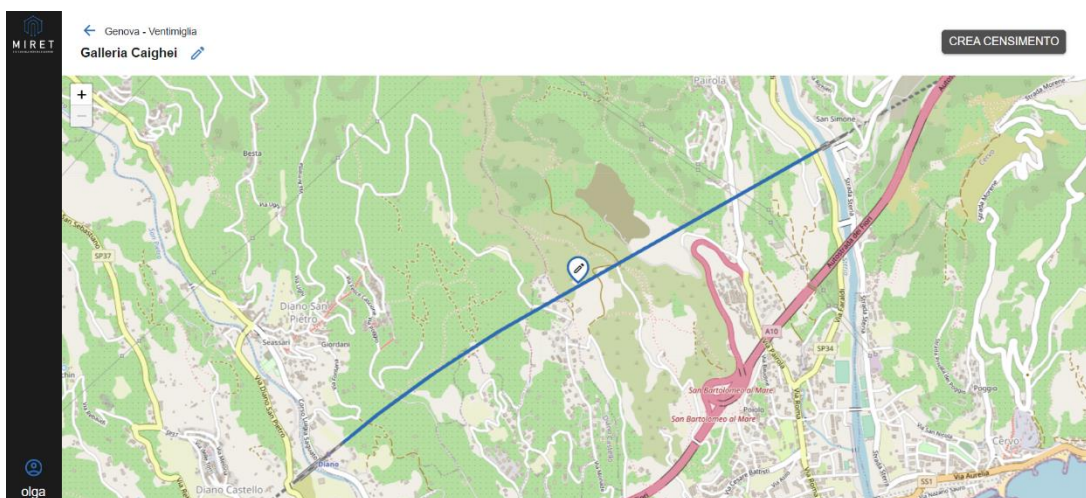
Il flusso di lavoro MIRET, con mappatura delle Priorità-Rischio e approccio pianificatorio-progettuale integrato può garantire un uso più efficiente ed efficace delle risorse in tutte le fasi di programmazione e l’esecuzione di tutte le fasi di realizzazione nel rispetto della linea di lavoro, dei problemi di progettazione e delle restrizioni causate da eventi eccezionali. Per permettere ciò, i dati esposti ai paragrafi precedenti devono essere caricati in un sistema comune di Asset Management, che permette poi di visualizzare il dettaglio dei singoli Moduli/Elementi dell’infrastruttura. Il sistema dovrebbe essere sempre di facile lettura, sfruttando ambienti Open per permettere un’integrazione con strumenti esterni e API (Application Programming Interface). Nel seguito si mostra il lavoro e le caratteristiche principali del sistema oggetto del presente studio, che può e deve avere connotazioni specifiche, spesso anche sostanziali, in funzione dell’Ente gestore degli Asset secondo i principi esposti ai capitoli precedenti.

Il lavoro di raccolta ed analisi dati territoriali, e delle loro interazioni con strutture ed infrastrutture, ha una valenza pianificatori e progettuale e si basa su dati geografici, ossia con una componente informativa legata alla loro posizione nello spazio. Tale approccio esprime al meglio le proprie funzionalità se organizzato in una banca dati territoriale che può venire mantenuta ed aggiornata con cadenza regolare, sulla base delle modifiche che vengono apportate dalla realizzazione di opere di messa in sicurezza, o più in generale da variazioni naturali o antropiche che coinvolgono le opere e le aree analizzate.

La Piattaforma ha come obiettivo la digitalizzazione, gestione e analisi dei dati provenienti dai diversi Moduli o Elementi dell'infrastruttura. La piattaforma permette di digitalizzare l'infrastruttura (Figura 4-47) ed effettuare manipolazione e analisi dei dati pianificatori del singolo elemento (Figura 4-48) in un unico ambiente di lavoro.



**Figura 4-47: Esempio di visualizzazione Infrastruttura su piattaforma MIRET.**

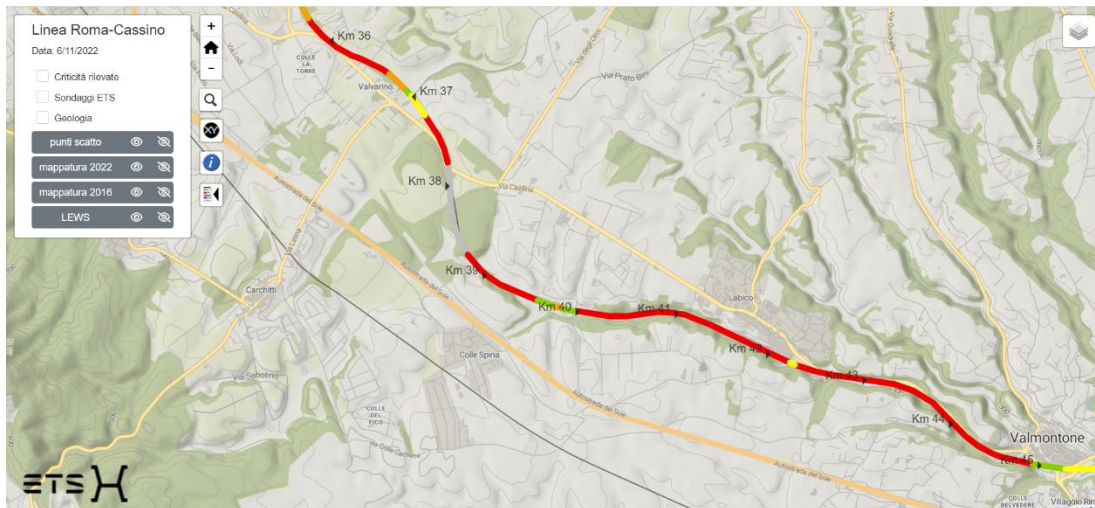


**Figura 4-48: Esempio di visualizzazione Galleria su piattaforma MIRET.**

L'utilizzo di una piattaforma web offre molteplici vantaggi, quali la possibilità di accedere agevolmente a dati open source, di gestire gli accessi web e di far fronte ad una mole elevata di informazioni e dati provenienti da diversi ambienti (interni ed esterni) e gestibili in un unico ambiente.

La piattaforma si interfaccia con altri strumenti web per gestire aspetti specifici propri di alcuni elementi. Nello specifico si mostra l'esempio della piattaforma WebGIS specifica che, a partire dalla piattaforma precedente, permette il dettaglio per

la gestione del rischio geomorfologico (Figura 4-49). La piattaforma permette di digitalizzare le analisi delle priorità per i versanti e scarpate e incidenti con l'infrastruttura ferroviaria.



**Figura 4-49: Esempio di visualizzazione in piattaforma delle Priorità specifica per i Versanti/Scarpate.**

I livelli informativi che possono essere accessi o spenti dalla legenda possono essere interrogati cliccando su ogni singolo elemento con il tasto sinistro del mouse. In funzione del layer che viene interrogato si otterrà una diversa risposta e verranno visualizzate informazioni relative a quel singolo elemento: immagini, link a documenti che possono essere aperti e scaricati, o qualsiasi altro elemento in formato digitale.

A seconda delle informazioni associate, la risposta sarà differente: alcuni oggetti restituiscono solo informazioni, altri restituiscono anche link a documenti che riguardano, per esempio, approfondimenti o studi particolari: tali documenti possono essere aperti e letti nel browser, oppure scaricati in locale.

Per rispondere all'esigenza di poter intervenire ed aggiornare la banca dati con informazioni nuove, in ogni WebGIS si permette l'invio di segnalazioni fatte durante le ispezioni. Per le infrastrutture lineari, ad esempio una linea ferroviaria, è possibile inserire informazioni direttamente dal sito mediante smartphone o tablet (e.g. crolli, frane, situazioni di degrado delle strutture), indicando la/le chilometriche di riferimento, una descrizione e allegare un documento o fotografia descrittiva della modifica. Tali dati vengono inviati ai server oltre che via mail ad operatori abilitati che si occuperanno della verifica, validazione ed eventuale modifica dei dati ed aggiornamento della banca dati.

Per permettere la visualizzazione di output complessi, la piattaforma incorpora un sistema di gestione e sovrapposizione degli output, su livelli e per anno di acquisizione/elaborazione, su base progressiva.

In questo modo l'utente può navigare nei singoli output senza bisogno di software specifici. Oltre alla semplice navigazione, all'utente è permesso anche di fare misure di distanze ed aree, visualizzare i dati ed eventualmente scaricarli.

## CONCLUSIONI

Il flusso di lavoro MIRET, con mappatura delle Priorità-Rischio e approccio pianificatorio-progettuale integrato può garantire un uso più efficiente ed efficace delle risorse in tutte le fasi di programmazione e l'esecuzione di tutte le fasi di realizzazione nel rispetto della linea di lavoro, dei problemi di progettazione e delle restrizioni causate da eventi eccezionali.

Contestualizzato e spiegato il framework di rischio, sostenibilità, tecnologia (e.g. BIM, IA, Mobile mapping) ed elementi analizzati (i.e. infrastruttura di trasporto ferroviaria), si è mostrato con un caso applicativo come sia possibile interfacciare le analisi di Priorità e Rischio di elementi diversi dell'infrastruttura con un approccio metodologico comune che permetta un ambiente digitale e integrato per le decisioni e le strategie. In particolare:

- Gallerie: l'utilizzo di un approccio basato sull'analisi multicriteria permette di individuare un Indice di Priorità sintetico combinando i parametri esposti al capitolo precedente, rappresentativo di ogni settore. La visione degli indici, sia delle classi di anomali, sia di Priorità, permette di visualizzare subito le aree più critiche, classificarle e adottare le strategie decisionali. Le tecnologie mobile mapping sono molto promettenti per le gallerie, così come la possibilità di digitalizzare tutti gli aspetti del sistema di Asset Management e in particolare le ispezioni. La gestione digitale con un modello unificato o un insieme di modelli georiferiti/sovrapponibili, permette un'integrazione più agevole delle informazioni. L'Intelligenza Artificiale sarà particolarmente utile per la scrematura dei Big Data che questi sistemi rilevano, sia nella loro accezione manuale, sia in quella automatica. In quest'ultimo caso è possibile avere maggiore oggettività e ripetibilità dei dati, potendo sfruttare al massimo questi algoritmi informatici e ingegneristici come MIRET;
- Versanti e Scarpate: l'analisi multicriteria permette di ottenere un quadro generale delle problematiche riguardanti la linea, mediante il calcolo di una Priorità che esprime la propensione al dissesto per ciascun tratto elementare di linea rendendo

possibile definire un elenco di interventi prioritari e progettare opere di protezione più appropriate;

- Cambiamento climatico: la visione degli indici di Priorità, permette di visualizzare subito le aree più critiche, classificarle in funzione delle variabili meteo-climatiche singole e/o accorpate e adottare le strategie decisionali per soddisfare l'obiettivo della tassonomia ambientale Europea di mitigazione del rischio al cambiamento climatico grazie al supporto di una procedura quantitativa.

Nei prossimi anni si prevede di lavorare maggiormente sui seguenti aspetti aperti:

- Valutazione quantitativa del rischio e procedura di valutazione sempre più integrata con tutti i sistemi della resilienza;

- Integrazione di sistemi di Early Warning (Allertamento) con il rischio e le procedure di gestione;

- Integrazione dei sistemi di gestione del rischio specifici e generali con il Sistema di Gestione della Sicurezza degli Enti gestori;

- Maggiore usabilità delle tecnologie e dei processi già consolidati (e.g. BIM);

- Maggiore implementazione delle tecnologie che richiedono banche dati e ulteriore sviluppo sperimentale (e.g. IA);

- Maggiore automatizzazione nell'integrazione dei dati dei diversi elementi dell'infrastruttura e delle componenti fisiche con le altre caratterizzanti la resilienza.

Le pietre miliari del MIRET sono varie e complesse, così come le connessioni tra i suoi elementi. Si richiede 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. Infrastrutture, 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).

L'obiettivo sarà quello di avere un sistema digitale e automatizzato, sempre meno incline a processi manuali, ma sotto il dominio dell'essere umano, soprattutto del suo know-how tecnico e della sua sensibilità di sistema, per cui potrà essere sempre e solo l'unico responsabile. Questa transizione è fondamentale per allinearsi in tempi brevi agli obiettivi nazionali e internazionali per garantire la sostenibilità della vita e delle nostre attività con il sistema pianeta in tempi brevi, come richiede l'urgenza delle attuali fragilità che stiamo vivendo e destinati a crescere con gli attuali squilibri nazionali e mondiali.

## BIBLIOGRAFIA

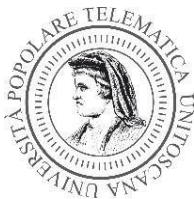
- AIPCR, 2014. *Convegno Nazionale AIPCR, CT 4.1 Gestione patrimonio stradale*. Roma, Associazione Mondiale della Strada.
- ANSFISA, 2021. *Relazione annuale sulla sicurezza delle ferrovie 2021*, Roma: ANSFISA.
- Barnet, A. F. et al., 2021. Climate services for tourism: An applied methodology for user engagement and co-creation in European destinations. *Climate Services*, 23(-), pp. -.
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A. L. & Mecogliano, P., 2015. High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *International Journal of Climatology*, 36(2), pp. 735-756.
- Castelli, E., 2012. *Infrastrutture viarie in sotterraneo: approccio progettuale*, Trento: Università degli Studi di Trento.
- D.Lg.vo 264/06 "Sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea" (2006) Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.
- Dalla Fontana, G., 2013. *Sistemazione dei versanti: cause di instabilità e interventi di consolidamento*, Padova: Università di Padova.
- De Vita, A., De Gaetani, C. I., Foria, F. & Calicchio, M., 2022. *Utilizzo di algoritmi basati sull'Intelligenza Artificiale nel monitoraggio di tunnel rivestiti in CLS: verifica e possibile integrazione nelle procedure ispettive*, Milano: Politecnico di Milano (Tesi Magistrale).
- Direttiva 2014/95/EU "Non Financial Reporting Disclosure" (2014) Unione Europea.
- European Banking Authority, 2020. *Guidelines on Loan Origination and Monitoring*, Parigi: EBA.

- Foria, F., 2013. Creare cartografia digitale grazie al GIS e al Remote-Sensing. *GEOMedia*, 10 Ottobre, p. 4.
- Foria, F. et al., 2019. *ARCHITA: an innovative multidimensional mobile mapping system for tunnels and infrastructures*. Lille, MATEC Web Conf..
- Foria, F. et al., 2022. *Deep Learning Based Detachment Segmentation: the MIRET Approach*. Roma, IEEE.
- Foria, F. et al., 2022. *Obiettivo Carbon Neutrality: ruolo, stato e prospettive delle osservazioni ambientali*, Roma: ICOS.
- 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*. Londra, Taylor & Francis.
- Foria, F. et al., 2021. *Modélisation des défauts et maintenance des tunnels existants avec une approche novatrice ( MIRET ): l ' étude de cas de la ligne de chemin de fer Gênes - Vintimille et du métro de Rome*. Parigi, AFTES.
- Foria, F., Giordano, R., Avancini, G. & Miceli, G., 2021. *Mitigation measures for the protection of coastal railways in the Flysch of Western Liguria*. Londra, IOP Publishing Ltd.
- Foria, F., Giordano, R., Tommasi, D. & Miceli, G., 2021. *Galleria Olmata, from survey to construction: an integrated design approach for the renewal of railway tunnels*, Kuala Lumpur: ITA-AITES.
- Foria, F. et al., 2022. *Digital transformation in the visual inspection of heritage railways tunnels: Technology, artificial intelligence and methodology*. Londra, CRC Press.
- Foria, F. et al., 2021. *Application of Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) to assess rockfall hazard and plan mitigation strategies along long infrastructures*. Londra, IOP Publishing.

- Foria, F. et al., 2021. *La rénovation des tunnels sur la ligne Rome – Naples : planification stratégique avec le système de modélisation mobile ARCHITA et approche intégrée pour le projet du Tunnel Olmata*. Parigi, AFTES.
- Foria, F. et al., 2022. *Mappatura dei rischi idrogeologici e del rischio al cambiamento climatico per le infrastrutture*. Roma, SIGEA.
- Hallegatte, S., Rentschler, J. & Rozenberg, J., 2019. *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity*, Washington: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.
- ICMQ, 2021. *La valutazione DNSH per le infrastrutture e il protocollo Envision*, Milano: ICMQ.
- ISO 26000 “Guidance for Social Responsibility” (2020) International Organization for Standardization.
- ISO 31000 “Risk Management” (2018) International Organization for Standardization.
- ISO 55000 “Asset management” (2014) International Organization for Standardization.
- ISO/IEC 17029 “Conformity Assessment – General principles requirements for verification and validation bodies” (2019) International Organization for Standardization.
- ISO/TS 17033 “Ethical claims – principles and supporting information” (2019) International Organization for Standardization.
- Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio delle gallerie esistenti lungo le strade statali o autostrade* (2022) Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile.
- Linee guida per la classificazione e gestione del rischio* *Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti* (2022) Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile.

- Lottini, D., De Gaetani, C. I. & Foria, F., 2021. *Analisi di sensitività di algoritmi per il riconoscimento automatico di ammaloramenti in tunnel ferroviari*, Milano: Politecnico di Milano (Tesi Magistrale).
- Manuale di progettazione gallerie* (2022) Rete Ferroviaria Italiana.
- NCHRP, 2009. *An Asset-Management Framework for the Interstate Highway System*, Cambridge: National Cooperative Highway Research Program.
- OECD, 2018. *Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct*, Parigi: OECD.
- OECD, 2021. *Building Resilience - New Strategies for Strengthening Infrastructure Resilience and Maintenance*, Parigi: OECD.
- Peppoloni, S. & Di Capua, G., 2021. *Geoetica: Manifesto per un'etica della responsabilità verso la Terra*. 1a a cura di Roma: Donzelli Editore.
- Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)* (2017) Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.
- Regolamento 2019/2088 "Sustainable Finance Disclosure Regulation"* (2019) Unione Europea.
- Regolamento 2020/852 "Tassonomia"* (2020) Unione Europea.
- Re, S., 2020. *Acque italiane: fact-checking su fiumi e torrenti nel nostro Paese*. [Online]  
Available at: <https://www.queryonline.it/2020/09/24/acque-italiane-fact-checking-su-fiumi-e-torrenti-nel-nostro-paese/>  
[Consultato il giorno 7 Aprile 2023].
- Spackman, M., Philips, L. & Pearman, A., 2009. *Multi-Criteria Analysis: A Manual*. 1a a cura di Londra: Department for Communities and Local Government.
- U.S. Geological Survey, 2004. *Landslide Types and Processes*, Golden: U.S. Geological Survey.
- UNI/Pdr 102:2021 "Afferzioni etiche di responsabilità per lo sviluppo sostenibile"* (2021) Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

World Bank Group, 2021. *Well Maintained: Economic Benefits from more Reliable and Resilient Infrastructure*, Washington: International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank.



# UNIVERSITA' POPOLARE DELLA TOSCANA

ASSOCIAZIONE PROFESSIONALE - LEGGE 4/2013 (artt. 4, 7 e 8)

Sedi di Milano, Firenze, Genova, Roma, Napoli, Caserta e Telematica

## DICHIARAZIONE ORIGINALITA' TESI

Io sottoscritta/o FORIA FEDERICO, matr. 76129091989 iscritta/o al PhD in Rischio e Sostenibilità nei Sistemi Complessi dell'Ingegneria Civile, laureanda/o nel mese di Maggio 2023

dichiaro che il presente lavoro dal titolo  
METODOLOGIA E TECNOLOGIE PER LA TRASFORMAZIONE DIGITALE E  
LA TRANSIZIONE ECOLOGICA NELLA PROGETTAZIONE E  
PIANIFICAZIONE DELLE INFRASTRUTTURE

è un elaborato prodotto da me e che tutto il materiale riportato (pubblicato o non pubblicato) è esplicitamente citato con riferimento alle fonti originali.

Sono consapevole delle conseguenze giuridiche che subentrerebbero, ai sensi della normativa vigente, se ai controlli sull'originalità del lavoro dovessero risultare parti non originali e di cui non è citata la fonte.

(Luogo e data)

Firma

11/04/2023, Pomigliano D'arco