

IL MONITORAGGIO STRUTTURALE DEI TUNNEL PER LA SICUREZZA



Massimo Chiarelli – Ingegnere progettista esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo

L'aumento del debito, l'aggravarsi della crisi e i tagli alla spesa pubblica colpiscono inevitabilmente anche il mercato delle opere pubbliche. Ricadute in termini di investimenti economici si sono avute



Figura 1 - Rete stradale e autostradale Anas e le tratte della rete TEN-T

nel settore delle infrastrutture di trasporto ed in particolare per quanto riguarda la costruzione di strade, autostrade e ferrovie le quali rivestono un aspetto peculiare per tutta la nostra economia soprattutto per le caratteristiche orogenetiche del territorio nazionale.

Gli importi messi in gara per le infrastrutture di trasporto hanno subito una flessione considerevole dal 2011 in poi.

Nel nostro tempo   diventato di vitale importanza per l'economia muovere le merci il pi  velocemente possibile sia per le industrie che per i consumatori finali. Avere una dotazione infrastrutturale carente, significa rallentare lo sviluppo economico. Esse sono ormai da tempo al centro del pi  ampio dibattito sulle prospettive di rilancio e di crescita del nostro paese Italia.   infatti, largamente condivisa l'idea che l'attuale sistema infrastrutturale italiano costituisca uno dei principali vincoli alla competitiv  del nostro tessuto produttivo e sia alla base del deterioramento dei livelli di qualit  della vita di ampie fasce del territorio. Si spende sempre

meno per costruire nuove infrastrutture e si investe poco per migliorare quelle gi  esistenti e/o solamente manutenzione al fine di garantire i requisiti minimi di sicurezza.



Figura 2 - Autostrada A12 Genova-Livorno, galleria Bordigona. Degrado diffuso del rivestimento definitivo.

ha un importante sviluppo, in termini di lunghezza, di tratti in galleria. Le gallerie sono parte integrante del sistema infrastrutturale di trasporto, essenziale per l'economia e fondamentale per migliorare la mobilità.

Le lunghe deviazioni generate dalle chiusure dei tunnel possono causare notevoli difficoltà sociali, economiche e ambientali alle comunità vicine a causa di deviazioni del traffico, deviazione di merci pericolose attraverso i centri abitati e quartieri, con conseguenti ingorghi, rumore e inquinamento.

Un'efficace ed organica gestione di una infrastruttura ed in particolare un tunnel, non può prescindere dalla messa in opera di un piano di controllo e monitoraggio dell'evoluzione dell'opera gestita. Nello specifico, oltre alla verifica della Sicurezza offerta agli utenti, il piano di monitoraggio dell'opera garantisce al Gestore

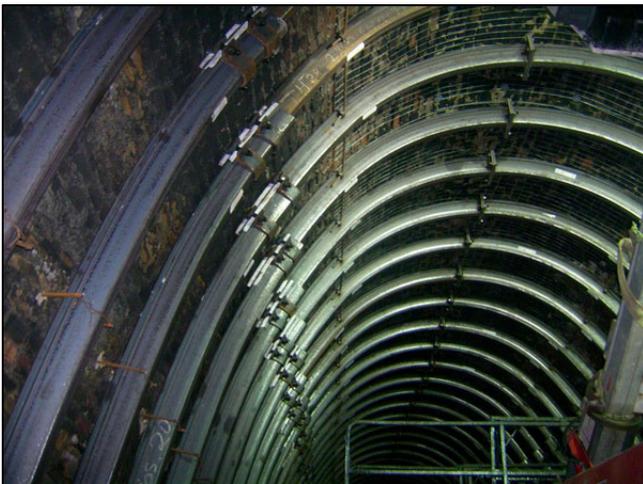


Figura 4 - Galleria ferroviaria GHERSI, Linea Cavallermaggiore – Alba (CN) - Consolidamento strutturale mediante centinatura.

Con le premesse di cui sopra e senza alcuna polemica poi, è curioso che di tanto in tanto negli anni qualche alto esponente politico della nostra repubblica faccia sorgere dal nulla “*il tunnel che non c'è*”, ma siccome tutti sanno che è indispensabile oppure che è palese potenziare e migliorare un certo asse di comunicazione piuttosto che un altro, allora ecco, come per magia, appare ciò che evidentemente ancora non è stato costruito semplicemente rilasciando una dichiarazione alla stampa.

La nostra rete urbana, extraurbana, autostradale e ferroviaria proprio per l'orografia del territorio,



Figura 3 - Autostrada A2 del Mediterraneo – Galleria Fossino, svincolo di Laino Borgo. Intervento strutturale di ricostruzione del rivestimento definitivo in C.A. con spessore ridotto di 30 cm.

gli strumenti per pianificare le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria allo scopo di mantenere adeguate performances funzionali dell'opera stessa.

Il degrado più o meno rapido nel tempo dello stato di conservazione di un tunnel va interpretato in funzione di tre elementi legati strettamente all'opera stessa:

1. Cause legate alla costruzione:
 - materiali e strutture impiegate;
 - metodologia di costruzione.
2. Cause al contorno:
 - Geologia;

- idrogeologia;
 - Ambiente.
3. Cause legate all'utilizzo e gestione:
- Traffico;
 - ventilazione.

La “buona regola dell’arte” vorrebbe che fosse creata una struttura di controlli atta a rilevare l’innesco di meccanismi o fenomeni di degrado e che fornisca gli strumenti per la valutazione e la proiezione dell’evoluzione dei fenomeni stessi. I risultati dei piani di verifica dovrebbero essere, infine, raccolti nei rapporti annuali sul monitoraggio redatti a termine di ogni esercizio.

Particolare attenzione deve essere posta allorquando si considera l’installazione di sistemi automatici o ad acquisizione remota come la soluzione al monitoraggio di dette opere, in quanto troppo delicate in un ambiente come quello di un tunnel stradale. In altri termini, possono essere impiegate per periodi medio brevi ma, non devono essere la soluzione definitiva.

Un esempio di piano di monitoraggio potrebbe essere quello schematizzato nella figura 6.



Figura 5 - Intervento strutturale di ricostruzione del rivestimento definitivo in C.A. con posa di nuova centinatura

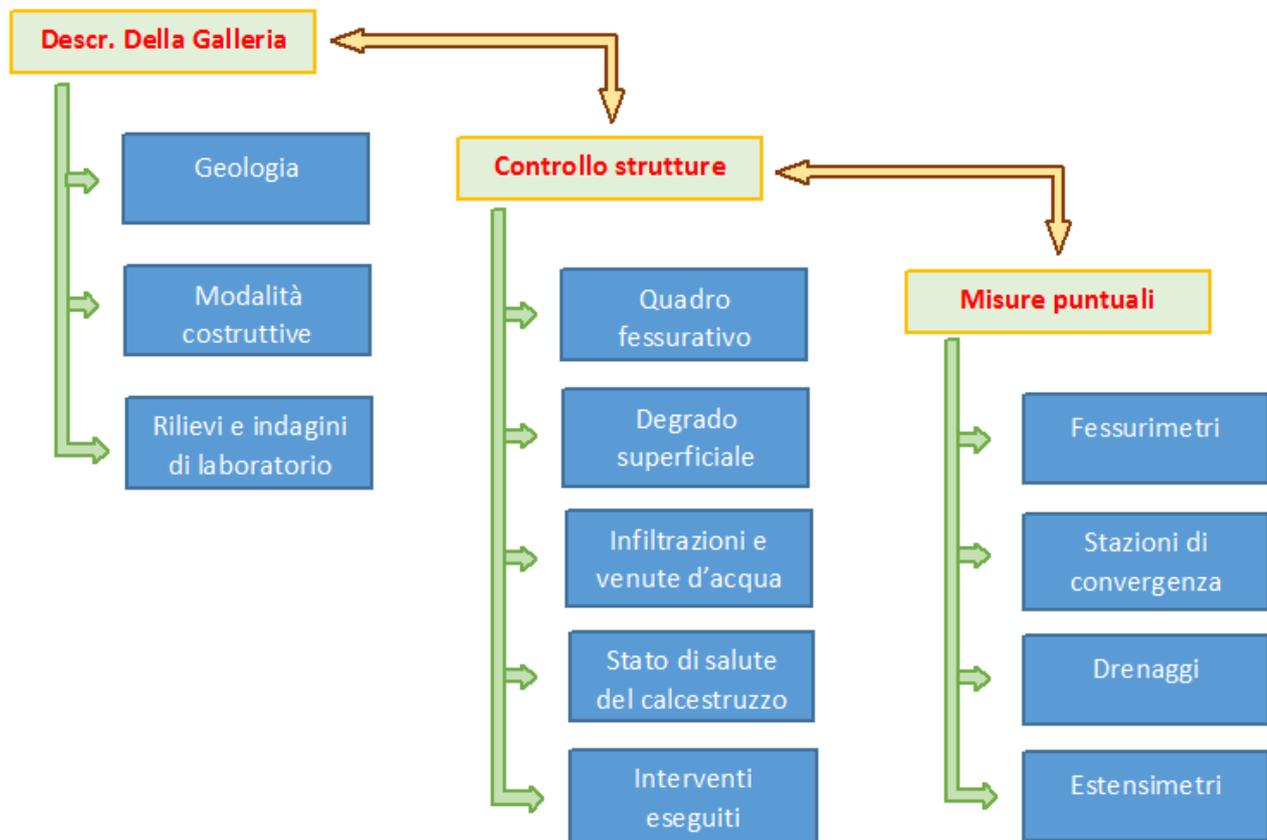


Figura 6 - Esempio di Piano di Monitoraggio per una galleria.

Come si evince dalla figura 6 un piano di monitoraggio strutturale è basato su una struttura gerarchica dei seguenti elementi:

1. Descrizione dell'opera (Elaborati di progetto e/o di interventi di manutenzione eseguiti);
2. Controllo sistematico della volta e del rivestimento definitivo in generale;
3. Controllo puntuale dei meccanismi evolutivi nel tempo.



Figura 7 - Galleria di Forca Canapine S.S. 685 delle "Tre Valli Umbre" danneggiata dal sisma del 30 Ottobre 2016.

Tenuto conto della nostra rete di trasporto ed il territorio che attraversa, l'attività di tunnelling sebbene cresca meno che nel resto del mondo, vengono costruiti tunnel più lunghi e più ampi che mai realizzati attraverso condizioni di terreno sempre più difficili. Inoltre, ci sono molte gallerie in aree alta sismicità e buona parte di esse si trova in aree densamente popolate e, quindi, richiedono standard di sicurezza molto elevati (ASCE 2009). Allo stesso tempo, c'è un

crescente interesse a livello mondiale sulla sensibilità delle gallerie all'attività sismica (M. Chiarelli - *Dinamica delle opere in sotterraneo*, *INGENIO* n°57 Ottobre 2017, Imready Srl – RSM).

Per di più, i danni nelle strutture di un tunnel sono difficili da valutare e le gallerie danneggiate che sono sopravvissute ad un forte terremoto, potrebbero non avere la capacità di "sopravvivere" alle successive scosse sismiche consecutive. Il comportamento delle strutture in elevazione è regolato dalle caratteristiche inerziali della struttura mentre, la risposta dinamica delle strutture in sotterraneo è governata dalla risposta deformativa del terreno circostante e dalla loro interazione cinematica. La differenza è una diretta conseguenza della trascurabile inerzia dell'opera in sotterraneo rispetto a quella del terreno che la circonda.

Dopo un terremoto, ci sono decisioni critiche da prendere da parte delle autorità per quanto riguarda la chiusura o meno di un tunnel. Un rilevamento rapido e affidabile dei danni e le valutazioni sulla struttura giocano un ruolo fondamentale anche ai fini della mobilità dei mezzi di soccorso.

Non ultimo quindi, è da considerare anche che le attività sismiche non sono l'unico motivo per il quale si ha bisogno di avere un'immagine strutturale del tunnel. La chiusura delle gallerie per urgenti interventi di manutenzione estese può essere evitata grazie a immagini rapide, puntuali e chiare delle sue condizioni strutturali, evitando impatti significativi sul flusso veicolare.

Un progetto che si sta sviluppando a partire dall'ottobre del 2013 e che sta fornendo ottimi risultati è il ROBO-SPECT cofinanziato dalla Commissione Europea e coordinato



Figura 8 - Galleria di Forca Canapine S.S. 685 delle "Tre Valli Umbre" danneggiata dal sisma del 30 Ottobre 2016.

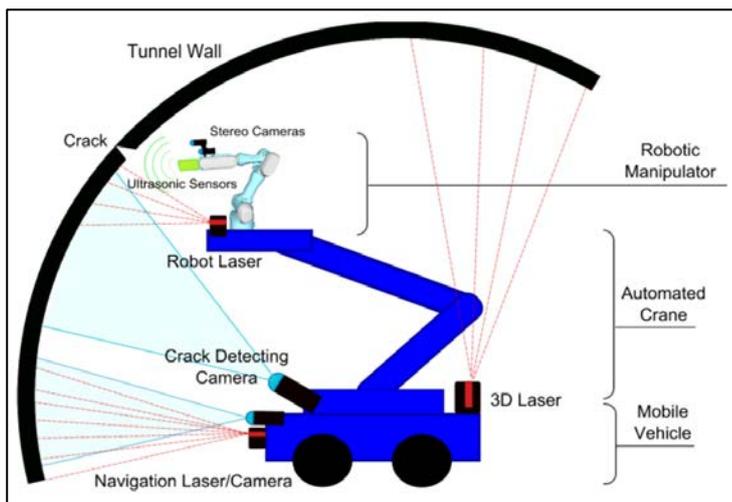


Figura 9 - Schematizzazione del funzionamento del ROBO-SPECT System.

dall'Institute of Communication and Computer Systems (Atene, Grecia). L'obiettivo di ROBO-SPECT è fornire una soluzione di ispezione e valutazione del tunnel automatizzata, più veloce e affidabile che possa combinare in un solo passaggio sia l'ispezione che la valutazione strutturale dettagliata che non interferisce con il traffico all'interno del tunnel stesso.

Ispezione e rilievo della volta

L'elemento di base del sistema di monitoraggio strutturale è rappresentato dal controllo periodico della volta. Questa

operazione è affidata generalmente a personale con specifica formazione di base ed esperienza circa le tipologie di dissesto strutturale nel calcestruzzo. L'attenzione del personale addetto è focalizzata al controllo e all'evoluzione dei quadri fessurativi, dei degradi superficiali, delle venute d'acqua ed alla verifica della correttezza ed efficacia degli interventi messi in opera in precedenza (se eseguiti). Devono essere necessariamente rilevate tutte le situazioni suscettibili di creare distacchi di materiale dalla volta (fessure, nidi di ghiaia od altre alterazioni, vecchie canalizzazioni di drenaggio, ecc.). Dovrà essere rilevata l'apertura delle fessure e la loro profondità. Particolare attenzione deve essere dedicata al rilievo delle fessure di compressione, delle quali occorrerà registrare estensione ed inclinazione rispetto alla normale al rivestimento.

Infine, dovrà essere predisposto un rilievo fotografico con procedura standardizzata in maniera tale da rendere confrontabili i rilievi nel tempo. Stazioni di misura delle convergenze a più punti di misura in galleria forniranno dei grafici che, confrontati con le misure eseguite in periodi

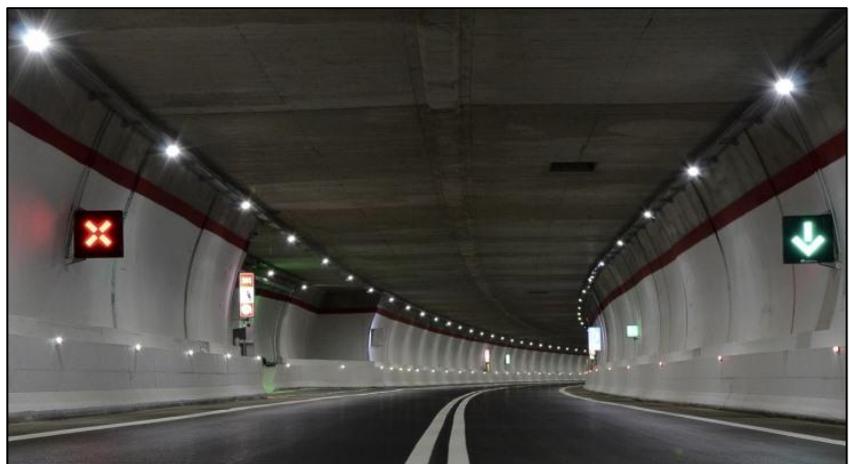


Figura 10 – La galleria Valnerina sulla S.S. 79bis Terni-Rieti dopo l'intervento di messa in sicurezza.

precedenti o in fase di costruzione per gallerie di nuova realizzazione, descriveranno eventuali fenomeni in evoluzione al fine di programmare possibili interventi.

I problemi più frequenti riscontrati in galleria

I problemi più frequenti che si riscontrano percorrendo le gallerie presenti sulle nostre infrastrutture di trasporto, sono principalmente quelli legati alle numerose infiltrazioni di acqua, concentrate essenzialmente in corrispondenza dei giunti di costruzione con ampie zone di ristagno d'acqua al di sotto del piano viario, con conseguenti fenomeni di avvallamenti e deformazioni della pavimentazione nonché, da ammaloramenti diffusi del calcestruzzo del rivestimento.

Non è un caso, quindi, che la maggior parte degli interventi di manutenzione straordinaria in galleria consistono in:

- realizzazione del sistema di drenaggio per i liquidi oleosi/pericolosi;
- realizzazione del sistema di drenaggio dell'acqua/liquidi;
- realizzazione di vasche di raccolta e separazione all'esterno delle gallerie;
- realizzazione dell'impianto idrico antincendio;
- realizzazione degli impianti di pompaggio a servizio dell'impianto idrico antincendio da installare all'esterno delle gallerie.

Infiltrazioni e venute d'acqua

Difendere dalle infiltrazioni il rivestimento definitivo in calcestruzzo di una galleria, sia essa stradale



Figura 11 - Intervento di scarifica del rivestimento definitivo per la rimozione delle porzioni di calcestruzzo degradato.

che ferroviaria, significa garantirne la durabilità nel tempo sia in termini strutturali che di fruizione vera e propria. Ed è proprio l'acqua di infiltrazione uno dei nemici principali di queste opere in sotterraneo che inesorabilmente le aggredisce giorno dopo giorno con situazioni di degrado strutturale e di decadimento degli standard di sicurezza e, non ultimo, il danneggiamento, a causa dell'umidità, degli impianti tecnologici di cui oggi sono dotate queste infrastrutture.

Il manifestarsi di infiltrazioni e, soprattutto, il loro perdurare, può essere fonte di considerevoli danni economici. Ciò comporta l'esigenza imprescindibile di interventi tempestivi e immediatamente risolutivi.

Quando si deve intervenire su gallerie esistenti per far fronte a questa vera e propria emergenza dovuta alle infiltrazioni, siano esse in pressione che non, tra le soluzioni più

efficaci ci sono i cementi osmotici e le resine poliuretatiche idroespansive.

I cementi osmotici

Basta percorrere una delle migliaia di gallerie presenti su una qualunque strada e autostrada del nostro paese per rendersi conto che le infiltrazioni e le venute d'acqua non sono poi cosa rara, anzi al contrario. Infiltrazioni e venute d'acqua che sono causate da una assenza o cattiva esecuzione dell'impermeabilizzazione a tergo del rivestimento definitivo, danneggiata dal tempo e dall'azione chimica dell'acqua, a seguito di interventi di manutenzione effettuati senza gli accorgimenti necessari a proteggerla.

Intervenire si può e si deve farlo tempestivamente perché tali situazioni



Figura 12 – Galleria del Risorgimento (AN) dopo il completamento dell'intervento di scarifica.

costituiscono un pericolo per la sicurezza degli utenti. Oggi, in aiuto, ci vengono i cosiddetti cementi osmotici.

Questi preparati sono ideali per realizzare un'impermeabilizzazione atta a formare una barriera contro le infiltrazioni di acqua e permettono di ottenere un rivestimento resistente agli agenti aggressivi e capace di resistere a spinte idrostatiche positive e negative. Pronti all'uso, possono essere applicati direttamente sull'intradosso del rivestimento definitivo a spruzzo e con spessori contenuti. I prodotti impermeabilizzanti a penetrazione osmotica formano, per aggiunta di acqua pulita, una malta cementizia della consistenza di una normale boiaccia. Una volta pulite le superfici da trattare (scarifica), eliminando anche le parti di calcestruzzo ammalorate, questa boiaccia viene spruzzata in strati millimetrici sulle superfici del rivestimento, preventivamente bagnate a saturazione, dall'interno della galleria stessa. Tutto ciò, sfruttando il sistema capillare aperto del calcestruzzo da trattare, rende possibile la penetrazione all'interno delle strutture di alcuni dei suoi componenti reattivi. Tale penetrazione viene favorita dalla presenza di appositi reattivi che provocano la diminuzione della tensione superficiale dell'acqua presente nei capillari, innescando così un processo di assorbimento dei reagenti della pasta applicata in analogo ad un processo osmotico (da cui il nome).

Resine poliuretatiche idroespansive

Le resine poliuretatiche idroespansive, sono formulati che, iniettati a pressione, reagiscono in presenza di acqua o di umidità bloccando le infiltrazioni, anche di notevole quantità, istantaneamente. Nel caso delle gallerie esistenti che hanno problemi di infiltrazioni e/o venute d'acqua, queste resine vengono iniettate dall'interno della galleria stessa a tergo del rivestimento definitivo (estradosso) in

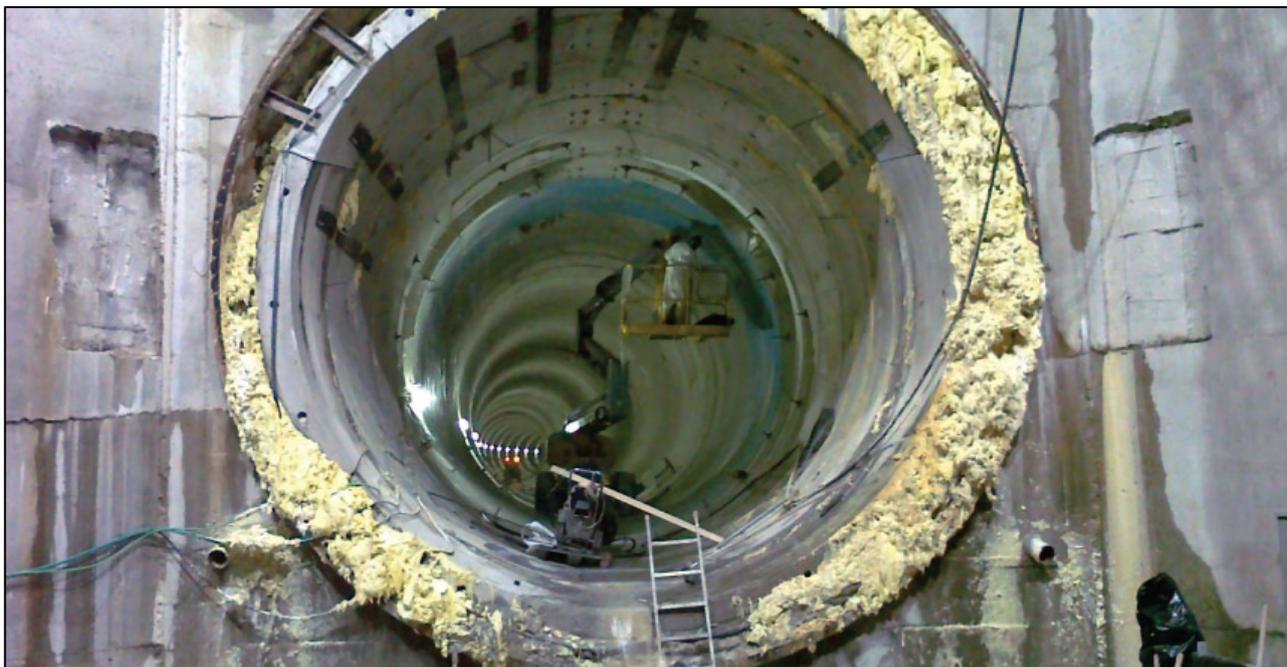


Figura 13 - Resina poliuretatica a tergo di un rivestimento in conci prefabbricati.

calcestruzzo nel quale vengono praticati dei fori. Le resine comunemente impiegate nei lavori in sotterraneo si suddividono in due gruppi:

1. le resine poliuretatiche (mono e bicomponenti) a base esclusivamente poliuretanic;
2. le resine organo-minerali (bicomponenti) a base poliuretanic e silicatic.

Conclusioni

Oggi si tende ad effettuare monitoraggi delle strutture privilegiando acquisizioni remote e “in tempo reale”. Purtroppo ciò ha spesso l’effetto negativo di produrre moli di dati ridondanti o di difficile interpretazione. Inoltre, poiché l’evoluzione dei fenomeni degenerativi di un’opera sotterranea presentano, ancora più di altre strutture, un’accelerazione dei degni nelle fasi conclusive, una grande mole di dati, porta inevitabilmente alla perdita di interesse per il dato, sia da parte del gestore, che non si preoccupa più di leggerlo, sia da parte di colui che lo interpreta. Da qui, la necessità di basare le osservazioni su un numero limitato di elementi che siano rappresentativi delle condizioni dell’opera, limitando la strumentazione a punti particolari, curando invece gli elementi rappresentativi dello stato dell’opera nel suo insieme nonché, le attività di reporting annuale in maniera chiara ed essenziale. Occorre dotarsi di un sistema di monitoraggio concepito come strumento a servizio del gestore per controllare l’opera gestita.

L’assetto dei rilievi eseguiti deve essere semplice, robusto, affidabile e riproducibile. Le componenti del sistema di monitoraggio devono poter essere, in massima parte demandate a personale con una formazione generale di base mentre, la fase di interpretazione dei risultati e controlli puntuali dovrà essere demandata a personale tecnico qualificato che affiancherà il Gestore nella definizione del piano degli interventi. ■

Bibliografia

- [1]. M. Chiarelli – “L’Arte del costruire gallerie” – Editrice | Uni Service, Trento, 2009
- [2]. M. Chiarelli – “Dinamica delle opere in sottterraneo” - "INGENIO web" del 12 Ottobre 2017, INGENIO n°57 Ottobre 2017, Imready Srl - RSM
- [3]. M. Chiarelli – “Gallerie esistenti: interventi rapidi e risolutivi su infiltrazioni e venute d’acqua” - “INGENIO” n°35 del 24 Agosto 2015, Imready Srl – RSM
- [4]. M. Chiarelli – “L’uscita dalla crisi passa attraverso un tunnel” - "INGENIO" 11 Aprile 2014, Imready Srl – RSM
- [5]. M. Chiarelli – “La ventilazione meccanica connessa alla sicurezza delle gallerie stradali” - "INGENIO web" del 15 Aprile 2016, Imready Srl - RSM
- [6]. M. Chiarelli – “Analisi di stabilità del fronte di scavo in galleria” - "INGENIO web" del 04 Febbraio 2016, INGENIO n°41 del 12 Aprile 2016, Imready Srl – RSM