

La preservazione degli speleotemi delle grotte di Villanova durante la realizzazione di una galleria mediante esplosivo

F. Alessandrini⁽¹⁾, A. Mocchiutti⁽²⁾

⁽¹⁾Alpe progetti srl società di ingegneria, Udine, Italia

⁽²⁾Geomok srl, Udine, Italia

ABSTRACT: La realizzazione di una galleria a supporto delle grotte di Villanova (UD) ha richiesto particolari accorgimenti nell'utilizzo dell'esplosivo finalizzati alla necessità di preservare gli speleotemi del rinomato polo turistico. La necessità assoluta di non superare le soglie vibrazionali che avrebbero potuto portare a rottura le fragili stalattiti note come “spaghetti” presenti in grotta, ha richiesto un'originale individuazione delle soglie di accelerazione e relative frequenze indotte dall'uso dell'esplosivo ed un attento monitoraggio in corso d'opera.

1 Inquadramento dell'opera e della specifica problematica

Nell'ambito del completamento del percorso turistico delle “Grotte di Villanova” per il quale sono stati previsti lavori mirati ad attrezzare un'ulteriore parte di grotta, è stata predisposta un'uscita mediante galleria in modo da creare un percorso di visita circolare grazie al quale il visitatore potrà percorrere la grotta in un'unica direzione.

Sulla base delle caratteristiche plano-altimetriche della grotta e del terreno superficiale, nonché della viabilità esistente in superficie, è stato deciso di procedere alla costruzione di una galleria molto inclinata (circa il 32%) lunga oltre 150 m e con una sezione a piedritti verticali e calotta circolare larga e alta circa 5.00m. La sezione trasversale della galleria è stata progettata sia in funzione delle modalità di scavo, sia in relazione alle esigenze di posizionamento di una scala di risalita e di un impianto a cremagliera interno.

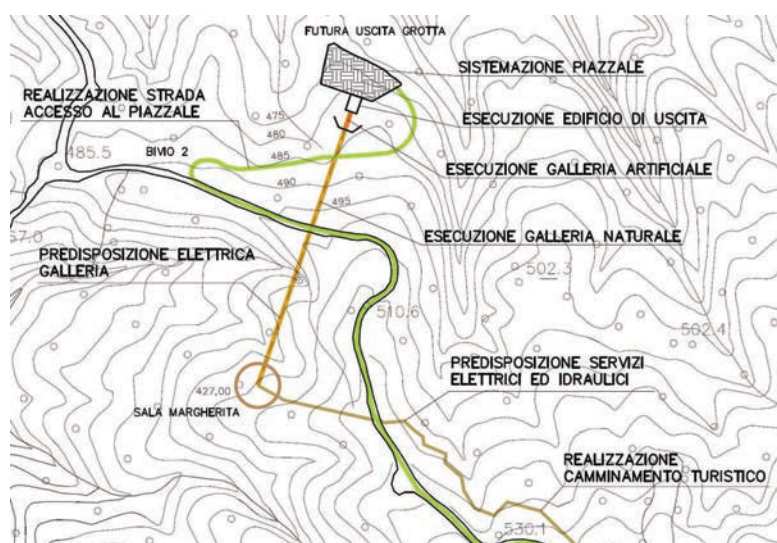


Figura 1. La parte terminale del nuovo tratto di grotta turistica e la galleria di fuoriuscita; la sala Margherita in cui sono presenti gli “spaghetti” si posiziona vicino alla base della galleria



Figura 2. Individuazione della posizione della nuova galleria d'uscita nell'ambito della grotta di Villanova

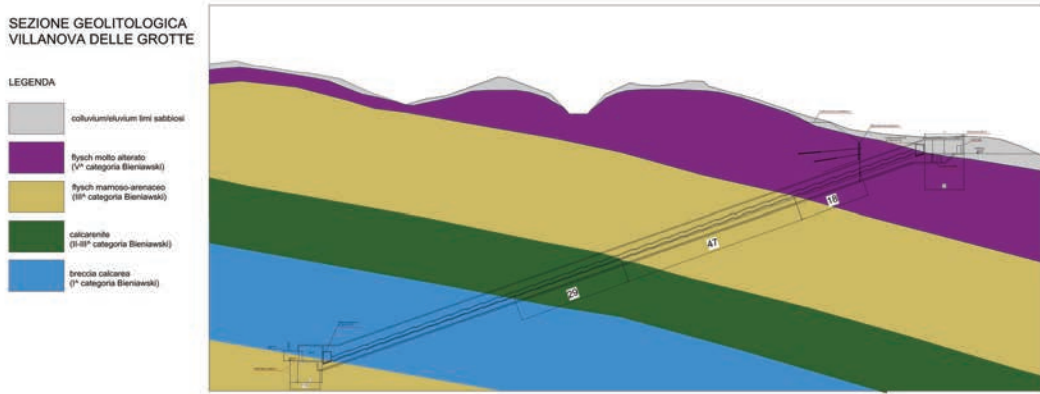


Figura 3. Sezione geolitologica della galleria di uscita della grotta di Villanova

La grotta si apre nella serie flyschoida che ha uno spessore di circa 450m. ed è costituita dall'alternanza di marne, arenarie, argilliti e calcareniti di età Eocenica depositate da frane sottomarine di enormi proporzioni provenienti da zone in emersione nell'area alpina. L'innesco di questi fenomeni di risedimentazione è probabilmente dovuto a terremoti o tsunami.

La cavità è un'eccezionale grotta di contatto che si sviluppa per 8 km tra il bancone calcarenitico e le alternanze marnoso arenacee.

Nel suo sviluppo a partire dalla sommità, la galleria di uscita dalla grotta incontra dapprima uno strato di flysch molto alterato (V° Bieniawski), passando poi in uno meno alterato (III° Bieniawski), in una calcarenite (II° Bieniawski) e in una breccia calcarea (I° Bieniawski). Gli ultimi strati hanno richiesto l'utilizzo di esplosivo per un "ragionevole" procedere delle operazioni di scavo.

Le esplosioni, a causa delle vibrazioni indotte nel terreno, avrebbero potuto sollecitare in modo eccessivo i delicati speleotemi presenti nella sala Margherita, una stupenda caverna di ragguardevoli dimensioni interamente rivestita sul soffitto dagli "spaghetti", delle particolari stalattiti, fragili e tubuliformi.

L'eventuale distruzione di questi elementi avrebbe portato ad un danno incommensurabile, distruggendo delle strutture naturali centenarie o millenarie, e impoverendo l'attrazione turistica della grotta. Ma come fare per essere sicuri di preservarli?



Figura 4. Il soffitto della sala Margherita foderato di “spaghetti”

In letteratura non siamo riusciti a trovare nessuna informazione che desse indicazioni sui valori di soglia (riguardo alla velocità di vibrazione del terreno e frequenze di risposta) potenzialmente dannosi per gli “spaghetti”. È nata così la necessità di individuare i valori di soglia e procedere poi ad un attento monitoraggio delle vibrazioni nella sala Margherita, variando le modalità di esplosione e l’entità delle volate via via che ci si avvicinava alla soglia prevista.

Il lavoro di monitoraggio e adeguamento continuo delle esplosioni è stato piuttosto complesso ed è stato appoggiato sui nuovi valori teorici di soglia di cui non eravamo certi non avendoli mai sperimentati prima.

Una sfida, insomma, che non ci ha lasciati tranquilli per lungo tempo.

Solo ora, dopo la conclusione dei lavori e non avendo rotto nemmeno uno spaghetti, siamo “sollevati” e certi che l’individuazione fatta è stata sufficientemente cautelativa.

2 Gli “spaghetti”

Gli “spaghetti” sono delle stalattiti formate da un tubo naturale di concrezione di calcite, all’interno del quale circola l’acqua di infiltrazione (fistolosa). I tubicini presentano un diametro esterno abbastanza costante e variabile, nel caso di Villanova, tra i 5 e i 10 mm, con il canale centrale del diametro variabile da 2 a 6 mm. Le massime lunghezze trovate sono di circa 2 m, ma la quasi totalità degli elementi è variabile tra i 10 cm e 100 cm.

Nello schema riportato si può individuare la struttura dello spaghetti che si origina a partire da una fessura nella roccia attraverso la quale percola la calcite che lo costituirà. Dal velo di calcite che inizialmente ricopre il soffitto, si distacca un collare policristallino formato da più cristalli incollati e diversamente orientati da cui inizia il tubo monocristallino formato da un’unica struttura cristallina continua di calcite, ovvero carbonato di calcio neutro CaCO_3 .

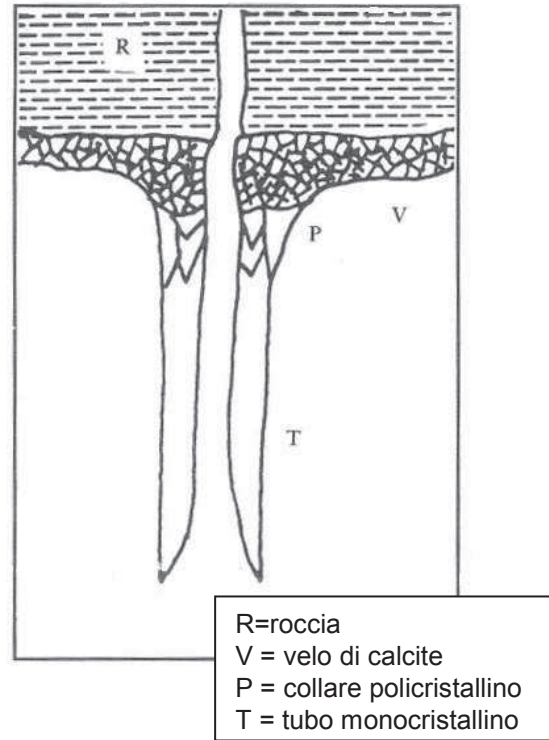


Figura 5. Lo “spaghetto”: dettaglio e schema costitutivo

Volendo pervenire ad una modellazione teorica degli spaghetti, si è subito mostrata evidente la grande variabilità dimensionale (lunghezza e diametro) ma, nel contempo, la sufficientemente regolare struttura tubolare.

È parso allora plausibile introdurli in una schematizzazione agli elementi finiti (FEM) come dei cilindretti verticali incastrati alla sommità (mensola incastrata), lunghi da 10 cm a 100 cm, del diametro esterno di 5 mm e 7,5 mm e spessore delle pareti di, rispettivamente, 0,75 mm e 1,00 mm. Nel modello ogni singolo spaghetti è stato schematizzato con un elemento beam suddiviso in 20 elementi finiti. Per il materiale di cui è costituito lo spaghetti sono stati assunti i seguenti parametri meccanici derivati dalle poche informazioni rintracciate in letteratura:

Tabella 1. parametri meccanici degli spaghetti

| parametro | valore | descrizione |
|--------------------------------|----------------------|---------------------------|
| γ | 27 kN/m ³ | peso specifico |
| E | 40000 MPa | modulo di Young |
| $\sigma_{\text{compressione}}$ | 50 MPa | resistenza a compressione |
| σ_{trazione} | 7 MPa | resistenza a trazione |

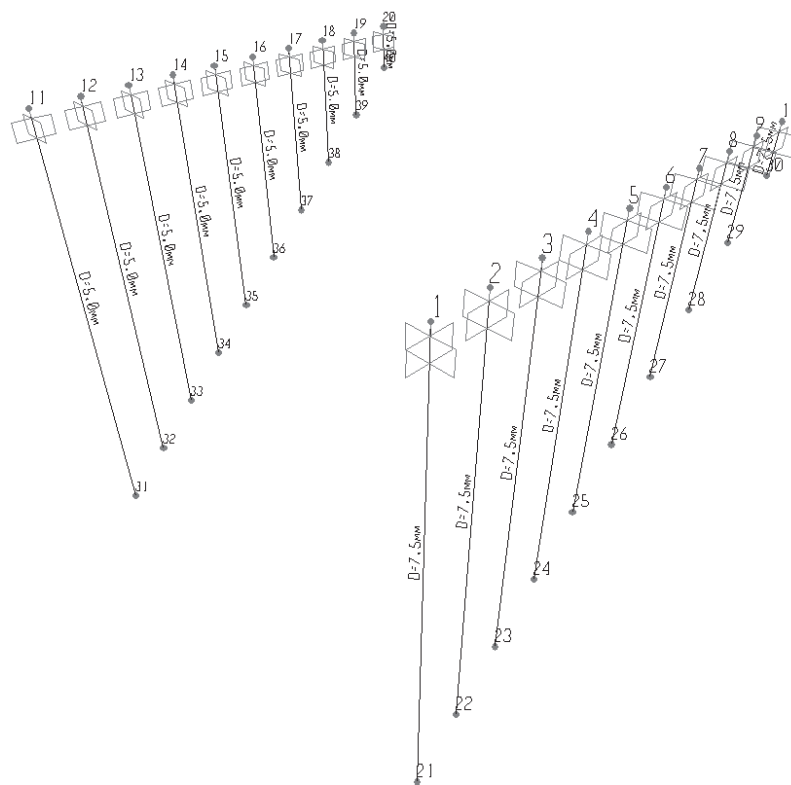


Figura 6. Schematizzazione FEM adottata per gli “spaghetti”, con elementi variabili in lunghezza e sezione trasversale

3 Il problema teorico da risolvere

Per cercare di capire quando gli spaghetti avrebbero potuto rompersi a causa della vibrazione indotta dall'esplosione, si è cercato di individuare quella accelerazione, variabile in funzione dei modi di vibrare delle piccole strutture, in grado di generare una sollecitazione flessionale sull'elemento (in genere in corrispondenza dell'incastro al soffitto) corrispondente al momento di rottura dell'elemento stesso. Nell'analisi, la sollecitazione tagliante non è mai risultata dimensionante.

Per lo studio teorico si sono subito assunte delle ipotesi semplificative quali quella, già citata, della forma cilindrica regolare degli spaghetti e quella che l'esplosione potesse essere descritta con delle forzanti di tipo impulsivo. Inoltre, nell'analisi dinamica conseguente, si è assunto (dato sperimentalmente non noto) di avere degli smorzamenti bassi ma realistici (1%) o addirittura nulli (meno realistici ma più cautelativi), considerando in generale che tali assunzioni costituiscano comunque elemento di cautela.

3.1 Le forzanti

Lo studio teorico è stato svolto sulla base di misurazioni preliminari e sulla base delle caratteristiche di campionamento della strumentazione che è stata poi utilizzata nel monitoraggio. La strumentazione permette la misurazione delle velocità delle particelle di terreno a partire da una velocità di 0,25 mm/s (soglia strumentale) e una frequenza di campionamento tale da ottenere una risoluzione in frequenza nello spettro del segnale di 0,2 Hz (segnali filtrati con filtro passa-banda tra 8 e 200 Hz). Dalle misure iniziali si è compreso che il segnale significativo nel terreno aveva una durata di circa 0,500 s, con il massimo di velocità raggiunto nella fase iniziale e con una durata di circa 0,060 s.

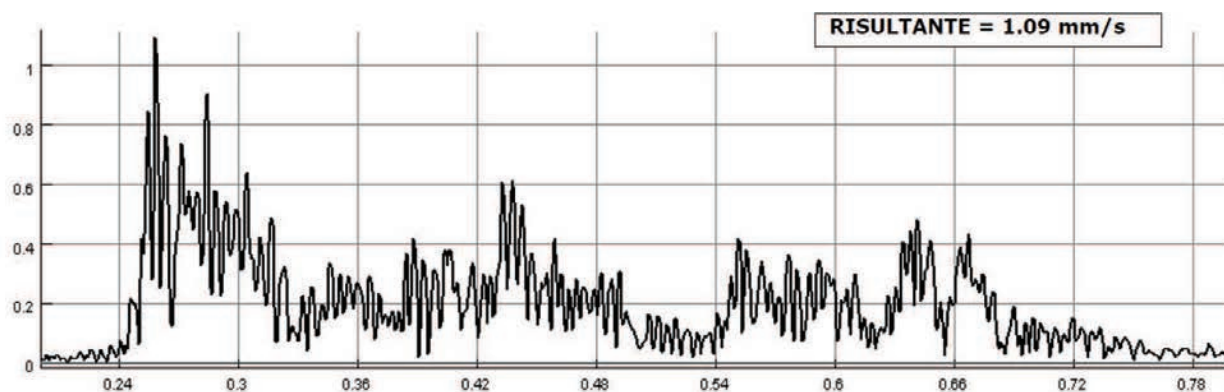


Figura 7. La risultante dell'andamento delle velocità delle particelle correlato al tempo durante una misurazione iniziale

La strumentazione ha permesso il rilievo indipendente delle velocità nelle 3 direzioni spaziali e l'estrazione delle funzioni di risposta che sono state analizzate nel dettaglio nel range di frequenze fra 40 e 100 Hz, giudicata massimamente significativa per il caso in esame e per le componenti in grado di sollecitare a flessione lo spaghetto (quelle orizzontali).

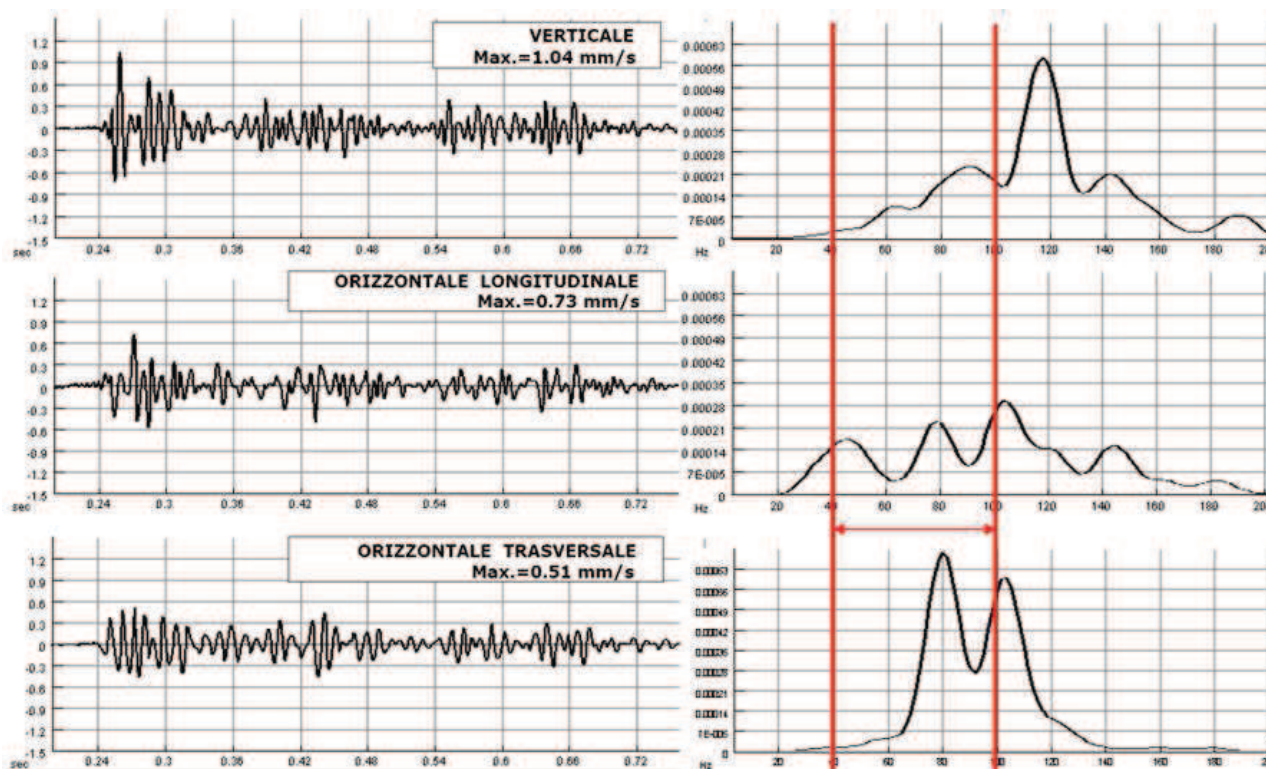


Figura 8. L'andamento delle velocità delle particelle correlato al tempo nelle tre componenti verticale, orizzontale longitudinale e orizzontale trasversale; a lato le funzioni di risposta e il range di frequenza significativo sul quale ci si è concentrati

La misura, acquisita in termini di velocità, è stata poi riportata in termini di accelerazione, ambito nel quale si è svolto lo studio teorico.

A partire da questi dati si è scelto di schematizzare la forzante del sistema, espressione dell'accelerazione alla base al variare del tempo, in due differenti modalità.

Una prima serie di forzanti è stata quella dell'"impulsivo a gradino", in cui si sono state applicate in successione 8 forzanti a durata variabile da 1/1000 di secondo a 600/1000 di secondo e intensità pari

a 1 m/s^2 . Una seconda serie, di tipo sinusoidale breve, ha visto l'utilizzo di 7 forzanti a frequenza propria variabile da 40 a 100 Hz, della durata di 0,6 s e modulo pari a 1 m/s^2 .

3.2 L'analisi e i risultati

L'analisi poi condotta è stata di tipo time-history lineare con integrazione tramite sovrapposizione modale e ha portato alla determinazione, caso per caso e in funzione delle frequenze proprie del singolo elemento e delle sue caratteristiche geometriche e meccaniche, dell'accelerazione che porta alla rottura flessionale dello spaghetti (accelerazione critica) e la frequenza relativa. La rottura è stata individuata in corrispondenza al valore di momento flettente in grado di generare una sollecitazione di trazione pari a 7 MPa.

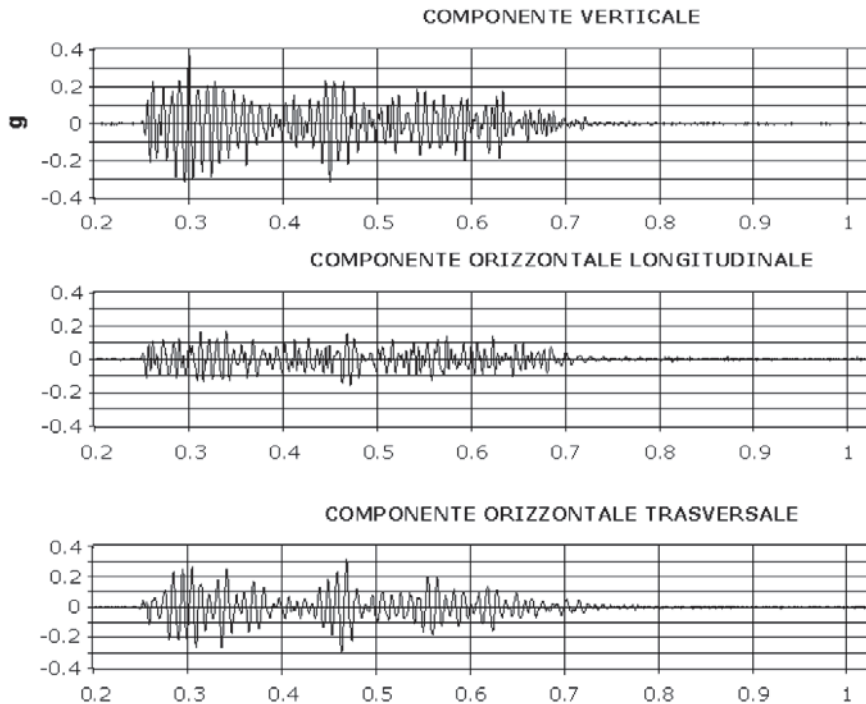


Figura 9. L'andamento delle accelerazioni delle particelle correlato al tempo nelle tre componenti verticale, orizzontale longitudinale e orizzontale trasversale

L'analisi ha permesso di estrarre dei grafici che illustrano lo spettro delle accelerazioni che, a seconda della lunghezza dell'asta e della frequenza, mettono in crisi lo spaghetti.

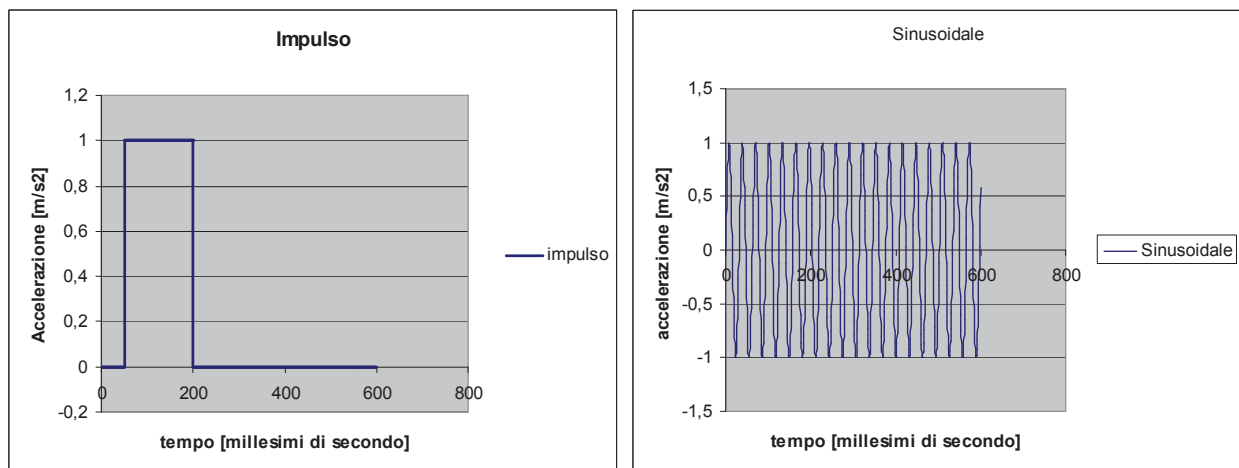


Figura 10. Schemi tipo delle forzanti impulsiva e sinusoidale utilizzate

Spettro delle accelerazioni (D = 5.0 mm)

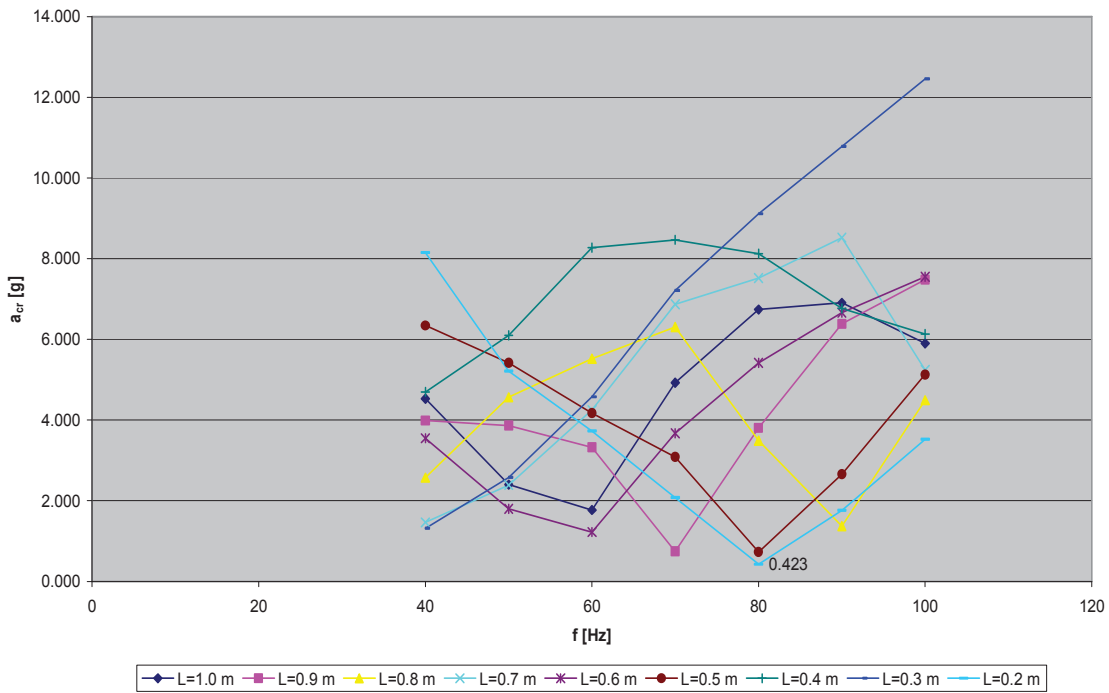


Figura 11. Accelerazioni che portano a rottura gli spaghetti al variare della lunghezza degli elementi, per il diametro di 5,0 mm e smorzamento pari a 1%

Spettro delle accelerazioni (D = 7.5 mm)

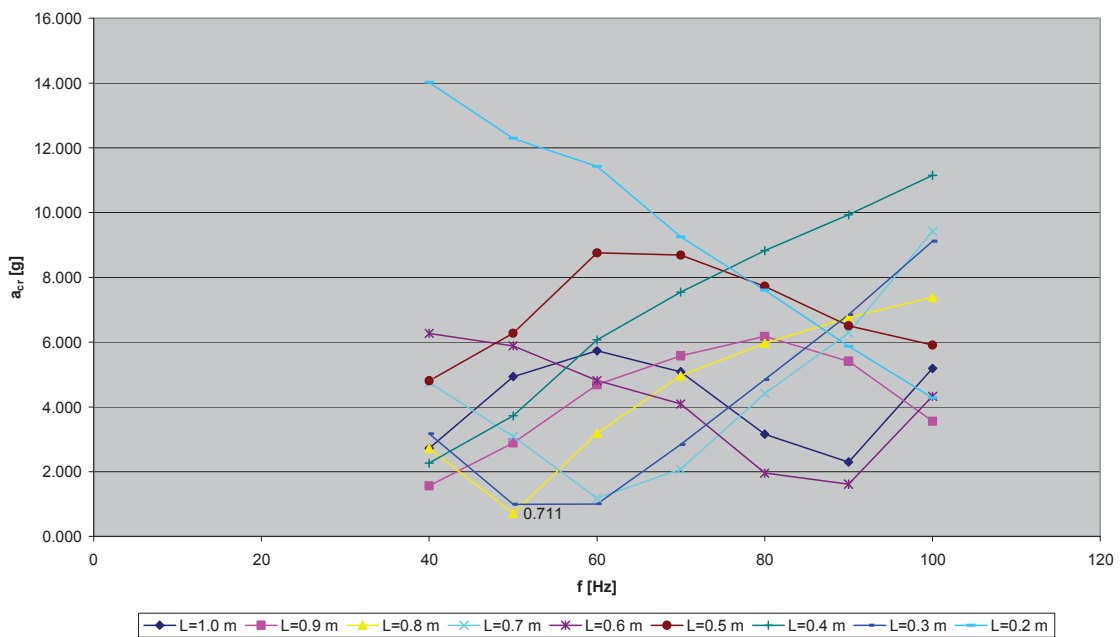


Figura 12. Accelerazioni che portano a rottura gli spaghetti al variare della lunghezza degli elementi, per il diametro di 7,5 mm e smorzamento pari a 1%

Nel grafico che segue potete vedere il riassunto conclusivo del lavoro teorico con presentazione anche, in funzione delle frequenze da circa 75 Hz a circa 130 Hz, dei dati ricavati dalle misurazioni in grotta dopo la singola esplosione nel periodo iniziale di scavo. Dallo studio teorico si è concluso che le accelerazioni relative alle frequenze attorno agli 80 Hz sono potenzialmente le più pericolose per determinate dimensioni degli spaghetti analizzati (spaghetti del diametro di 5 mm e lunghezza 20 cm). Lo spettro di minima delle accelerazioni è stato utilizzato come dato di soglia da non superare e ha guidato l'adeguamento della potenza e delle modalità delle esplosioni man mano che le stesse si avvicinavano alla grotta monitorata.

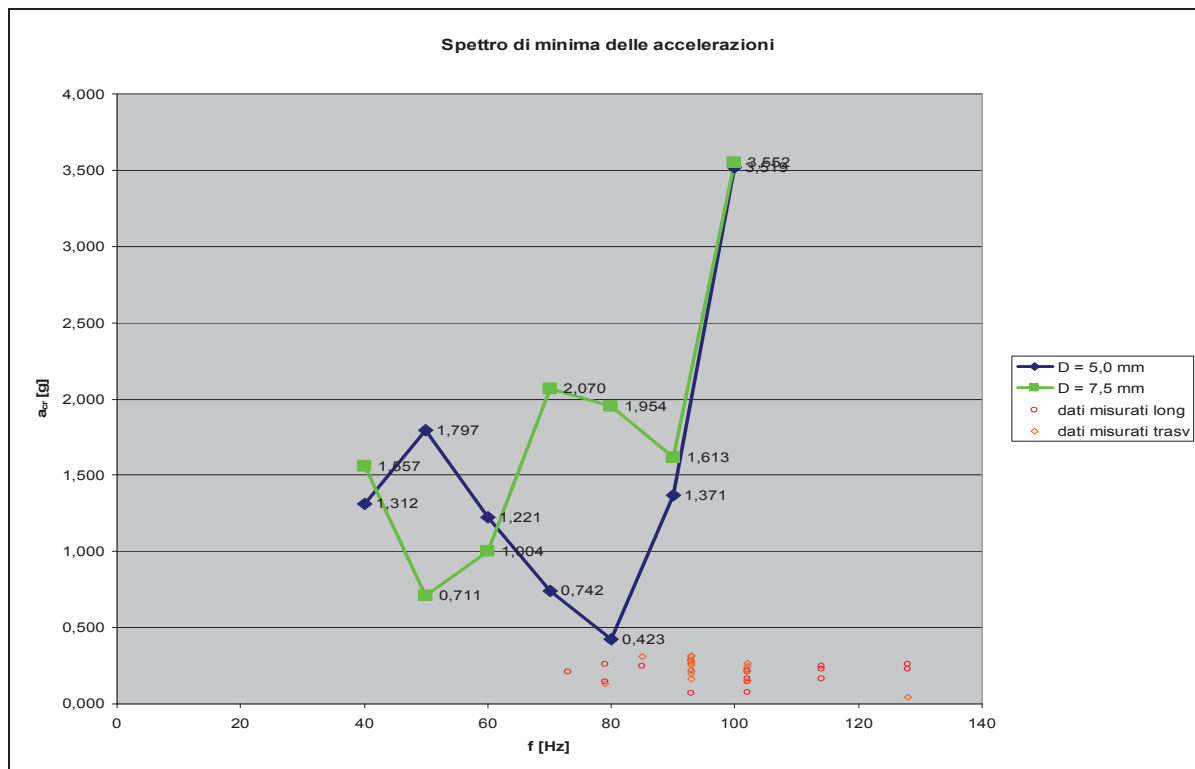


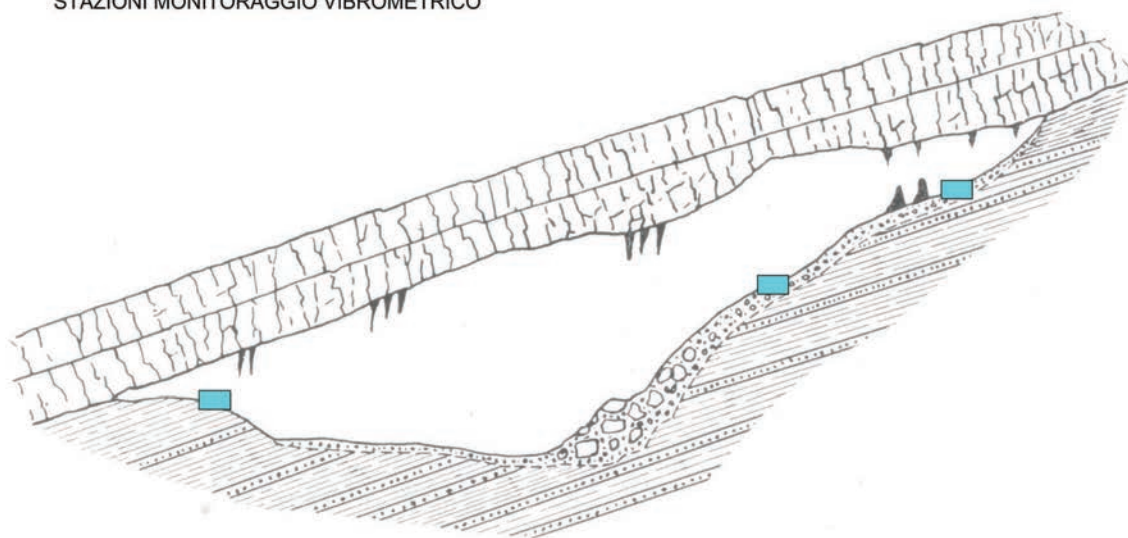
Figura 13. Involuppo delle minime accelerazioni in funzione delle frequenze che portano a rottura gli spaghetti, per i due diametri di 5 e 7,5 mm; alla base si notano le accelerazioni effettivamente riscontrate nella prima fase di misure

4 Il sistema di monitoraggio

Il sistema di monitoraggio è stato realizzato con 4 stazioni di misura con strumenti Instantel Plus; di queste stazioni, una era fissa all'interno della cavità e le altre mobili in cavità o in galleria.

La stazione fissa era ubicata presso il punto previsto per lo sbocco della galleria in grotta e le altre in un punti più distali della sala, in mezzo alle concrezioni. In via cautelativa si è sempre fatto riferimento ai valori registrati presso lo sbocco previsto della galleria all'interno della cavità naturale.

Non essendo possibile alcun collegamento wireless con l'esterno della grotta, in seguito ad ogni volata veniva eseguito un controllo visivo della cavità ed un download dei dati dalle singole stazioni. Sulla base dei risultati veniva predisposta la volata per l'intervento successivo.



Sala Regina Margherita
SEZIONE MORFOLOGICA SALA "REGINA MARGHERITA"

Figura 14. Sezione morfologica della sala Margherita con ubicazione stazioni di monitoraggio vibrometrico

4.1 Statistica delle rilevazioni eseguite

La statistica è stata prodotta su 211 valori di ogni componente a partire dai valori minimi presentati da ciascuna di queste e per un incremento di velocità di 2 mm/s.

Esiste un limite superiore – e la concentrazione più significativa della distribuzione di frequenza è ben inferiore a questo – delle velocità secondo le due componenti orizzontali che corrisponde a 10-11 mm/s.

Oltre tale valore, il contributo della risultante è dato soprattutto dalle vibrazioni indotte secondo la componente verticale (vedi il calo della distribuzione per le orizzontali). Il valore di 15 mm/s – che corrisponde alla moda della distribuzione della risultante – è certamente rappresentativo della distribuzione di tale velocità: viene riscontrato nel 14,2% dei casi. Da considerare comunque anche la mediana – 12,6 mm/s – data la diluizione dei valori di velocità in un ampio intervallo, compreso tra 3 e 21 mm/s, proprio per la non influenza esercitata solitamente dai valori estremi su tale parametro statistico.

Le differenti risposte indotte in velocità dalla calcarenite, durante l'avanzamento dello scavo, indicano soprattutto le diverse resistenze di tale litotipo, in rapporto alle configurazioni di scoppio realizzate per migliorare specialmente l'operazione di rinora.

Tenendo sempre presente l'operatività del lavoro e le vibrazioni indotte, si sono potute apportare migliorie efficaci per la sequenza dei tempi di innesco, la parzializzazione del fronte e quindi il dimensionamento delle cariche unitarie. Dato l'andamento unimodale delle distribuzioni relative alle due componenti orizzontali T ed L, la moda è il valore di velocità che le rappresenta nella maniera migliore: vale rispettivamente 4,46 mm/s (28,9%) nel caso della trasversale, mentre vale 6,71 mm/s (22,3%) nel caso della longitudinale.

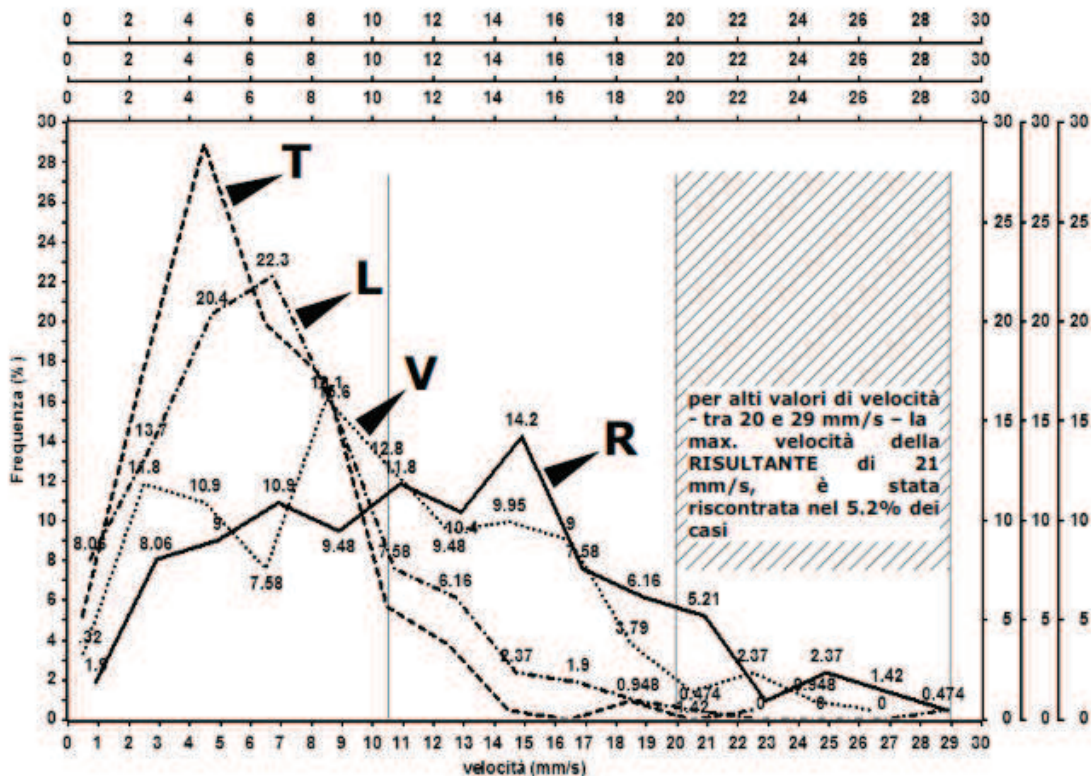


Figura 15. Poligoni di distribuzione % della frequenza per i dati di velocità delle singole componenti e della risultante

5 Avanzamento con esplosivo: modalità di gestione delle volate e loro variazione

La ricerca del giusto compromesso tra velocità di avanzamento e mitigazione delle sollecitazioni indotte dallo scavo ha permesso di valutare le metodologie più opportune per l'abbattimento delle vibrazioni tra cui:

- diminuzione dello sfondo in avanzamento;
- scelta dell'esplosivo;
- variazione del diametro dei fori in volata;
- posizione e scelta dei detonatori;
- inserimento di un aiuto rinora;
- variazione dei ritardi nella rinora e aiuto rinora;
- diminuzione della quantità di esplosivo per ogni foro;
- cambio della tipologia di rinora;
- divisione della volata in due o più settori;

Nelle condizioni più prossime alla cavità in presenza di una calcarenite molto compatta gli avanzamenti sono stati molto bassi, con sfondi di 50 – 70 cm e con parzializzazione delle volate. Il controllo e l'analisi dei dati vibrometrici ha consentito di usare l'esplosivo fino a 1 m di distanza dalla grotta senza causare nessun danno alla stessa e alle sue preziose concrezioni.

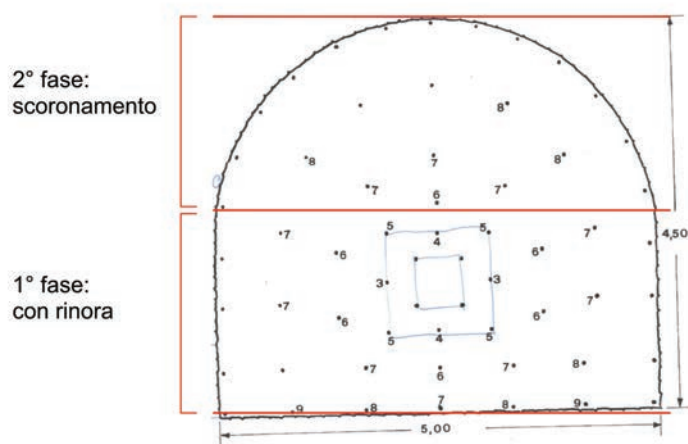


Figura 16. Sezioni schematiche delle volate (volata in due settori)



Figura 17. Preparazione alla volata e veduta della galleria

6 Conclusioni

Per poter controllare che le esplosioni utilizzate nella formazione della galleria di uscita delle grotte non mettessero in crisi i fragili “spaghetti”, è stato necessario valutare in modo teorico originale quali fossero le accelerazioni del terreno in grado di portali a rottura.

Lo spettro di minima delle accelerazioni di rottura individuate in funzione delle frequenze e delle tipologie delle stalattiti presenti, ha permesso di avere uno strumento di riferimento durante l’intensa attività di monitoraggio che è stata espletata durante la realizzazione della galleria.

Il non superamento dei valori di soglia ha richiesto un adeguamento continuo delle esplosioni, sia in termini di potenza sia di posizione dell’esplosivo, con variazione a step dell’entità delle volate.

Tali adeguamenti, onerosi da un punto di vista operativo, hanno permesso il completo raggiungimento del risultato voluto e cioè l’assenza di rotture nei fragili e “anziani” tubicini di calcite.

7 Ringraziamenti

Si ringrazia il dott Roberto Linari per la collaborazione nel processing dei dati ed i consigli tecnici e Ivano Dell’Agnola, fuochino responsabile delle volate.

8 Bibliografia

Alessandrini F. et al (2010). Completamento del percorso turistico delle grotte di Villanova – progetto esecutivo del II° e III° lotto, Comune di Lusevera (UD), Italia.

Un approccio metodologico per la progettazione degli interventi di ripristino e consolidamento strutturale di gallerie esistenti

Ing. Marco Puccinelli⁽¹⁾, Ing. Nicola Avagnina⁽¹⁾, Ing. Andrea Dallari⁽¹⁾

⁽¹⁾Studio tecnico Ing. Puccinelli, Parma, Italy

ABSTRACT: L'Italia detiene in Europa la maggiore percentuale di gallerie stradali, autostradali e ferroviarie, sia in termini assoluti sia in rapporto all'estensione della rete infrastrutturale presente. Gran parte delle opere in sotterraneo risale a oltre 30 anni fa, pertanto molte di esse necessitano interventi di ripristino e/o di consolidamento strutturale al fine di garantire l'esercizio in condizioni di sicurezza statica e funzionale, oltre che un'estensione della vita utile.

L'estrema variabilità dei contesti territoriali ed urbanistici, oltre che delle tipologie realizzative adottate, richiede un approccio metodologico di progettazione finalizzato alla corretta individuazione degli interventi. In considerazione del livello di confidenza del quadro conoscitivo e subordinatamente all'individuazione delle cause responsabili del degrado, è necessario identificare gli scenari di rischio potenziale e quindi le tipologie di intervento più idonee alla mitigazione del livello di rischio associato.

Per tale scopo è essenziale raccogliere la maggior quantità di informazioni, incluso lo storico delle eventuali problematiche occorse durante la realizzazione delle opere; ciò contribuirà alla definizione del modello geotecnico e strutturale di riferimento, da utilizzarsi anche per l'individuazione del sistema di monitoraggio dell'opera, nel corso dei lavori e nel lungo termine.

L'organizzazione dei vari dati all'interno di una piattaforma WebGis potrà semplificarne il processo di archiviazione, di elaborazione e di consultazione, rendendone effettivo ed efficace l'utilizzo.

1 Introduzione

L'Italia detiene in Europa la maggiore percentuale di gallerie stradali, autostradali e ferroviarie, sia in termini assoluti sia in rapporto all'estensione della rete infrastrutturale presente. Gran parte delle opere in sotterraneo risale a oltre 30 anni fa, costruite con mezzi, materiali e tecnologie ormai superate, e nel corso del loro esercizio sono state esposte ad un continuo incremento dei volumi di traffico con peggioramento delle condizioni ambientali agenti. Tali fattori hanno contribuito ad aumentarne le condizioni di degrado e a ridurne la vita utile, comportando anche problematiche di sicurezza, sia statica che funzionale.

Anche il legislatore di recente ha posto l'attenzione alle gallerie già esistenti, inserendole come argomento specifico sia nel Dlgs. N. 264/2006 (*“attuazione della direttiva 2004/54/CE in materia di sicurezza per le gallerie della rete stradale transeuropea”*) sia nel DM 28/10/2005 (*“sicurezza nelle gallerie ferroviarie”*) tramite un processo di verifica ed eventuale adeguamento al fine di garantire un adeguato standard di qualità e sicurezza. Infatti, i requisiti e le misure di sicurezza da adottare in una galleria devono basarsi sulla considerazione sistematica di tutti gli aspetti del sistema comprendenti l'infrastruttura, l'esercizio, gli utenti, il materiale rotabile (nel caso delle gallerie ferroviarie) e ovviamente la sicurezza strutturale.

In Italia, ma non solo, molte delle opere in sotterraneo con una vita utile superiore ai 30 anni presentano uno stato di conservazione deteriorato (per invecchiamento fisiologico, condizioni ambientali sfavorevoli, azione ciclica gelo-disgelo, carbonatazione, difetti costruttivi, etc.) tale da necessitare di interventi di ripristino e/o di consolidamento strutturale al fine di garantire l'esercizio in condizioni di sicurezza statica e funzionale, oltre che prolungarne la vita utile.

La scelta dell'intervento di ripristino e/o consolidamento più idoneo è un argomento tutt'altro che banale e sicuramente non univoco, in quanto deve tenere conto di aspetti di varia natura, quali: contesto territoriale ed urbanistico, condizioni geotecniche del terreno al contorno dell'opera, aspetti costruttivi, materiali (ad esempio rivestimenti in pietrame, laterizi, calcestruzzo, misti, etc.), geometria della galleria, tipologia e condizioni di degrado, variabilità delle condizioni di degrado lungo lo sviluppo della galleria.