

IL CASO DELLA GALLERIA BORZOLI-ERZELLI

**MITIGAZIONE DELLE VIBRAZIONI INDOTTE DALL'AVANZAMENTO IN GALLERIA
MEDIANTE ESPLOSIVO PER IL SOVRAPPASSO DELL'AUTOSTRADA A10**

L'avanzamento a sezione ridotta

Lo scavo di gallerie con esplosivo produce la propagazione di onde sismiche con conseguenti fenomeni vibratorii nell'ammasso circostante. Se lo scavo interferisce con strutture o infrastrutture preesistenti è necessario valutare preventivamente gli effetti prodotti su queste da tali fenomeni vibratorii, onde poter prendere le contromisure eventualmente necessarie per evitare di danneggiarle.

Dal punto di vista teorico, la stima della sismicità indotta da volata è molto complessa, in quanto i parametri che influenzano le onde sismiche che si propagano nell'ammasso roccioso sono molteplici e, il più delle volte, è dispendioso, in termini economici, stimarli con sufficiente precisione.

Un approccio comunemente utilizzato è legare l'intensità degli

effetti, prodotti sulla preesistenza dai fenomeni vibratorii, alla velocità di vibrazione delle particelle e alla frequenza, parametri facilmente misurabili tramite comuni sensori vibrometrici.

A partire dai valori misurati durante l'avvicinamento del fronte di scavo all'interferenza, è possibile ricostruire la specifica "legge del sito", ovvero legare la velocità di vibrazione nel contesto in esame alla distanza dalla fonte e alla quantità di esplosivo che detona contemporaneamente. Tale legge consente non solo di prevedere l'effetto dello scavo in prossimità dell'interferenza a partire dai dati ottenuti a distanze maggiori, ma anche di valutare le possibili variazioni sulle volate da applicare al fine di ridurre gli effetti indotti e garantire la sicurezza delle strutture preesistenti.

L'articolo illustra brevemente i modelli previsionali maggiormente

impiegati nella pratica professionale per la stima delle vibrazioni indotte da volate in ammassi rocciosi; ne mostra quindi l'applicazione al caso dello scavo della galleria Borzoli-Erzelli (facente parte del progetto Nuova Viabilità Borzoli-Erzelli del Comune di Genova), il cui tracciato sovrappassa la preesistente galleria autostradale a doppia canna Don Guanella (Autostrada A10) con un franco di soli 6 m (Figura 1).

Saranno esposte le scelte progettuali e le modalità operative adottate per la realizzazione dello scavo nella zona dell'interferenza, confrontando in ultimo le previsioni sugli aspetti vibrazionali coi risultati della campagna di monitoraggio.



1. L'inquadramento dell'opera

CENNI SULLE VIBRAZIONI INDOTTE DALLO SCAVO

La stima dei livelli di sollecitazione dinamica prodotta dal brillamento di una volata può essere condotta, in prima analisi, con criteri previsionali teorici.

A questo proposito, esiste in letteratura una varietà di correlazioni semi-empiriche, scaturite da considerazioni scientifiche e analisi statistiche [1], definite generalmente con l'espressione "legge del sito", che legano le variabili in gioco con relazioni del tipo:

$$v = k \cdot Q^\alpha \cdot R^\beta \quad (1)$$

dove:

k, α e β = coefficienti dipendenti dal tipo di roccia e dal tipo di volata;

Q = quantità di esplosivo che detona nello stesso istante (kg);

R = distanza tra la sorgente di vibrazione e la stazione di misura (m).

Dato che ogni sito risponde alle sollecitazioni in maniera diversa e non esattamente prevedibile sulla base delle sole considerazioni teoriche, che possono essere impiegate unicamente in fase di predimensionamento degli interventi, sono state messe a punto alcune tecniche sperimentali di previsione fondate su misurazioni in situ. A questo proposito, un approccio comunemente utilizzato dagli sperimentatori per prevedere il valore della velocità delle particelle è l'applicazione della "legge empirica della distanza scalata" [2]:

$$v = k \cdot DS^\alpha \quad (2)$$

dove:

v = massima velocità vibratoria attesa (m/s);

DS = distanza scalata (m/kg^{1/2} o m/kg^{1/3});

k e α = costanti adimensionali empiriche aventi significato puramente statistico.

La distanza scalata DS è definita come:

$$DS = R / Q^\beta \quad (3)$$

L'esponente β può variare tra 1/2 e 1/3, in funzione [3]:

- della forma della carica cilindrica o sferica;
- della distanza dal punto di sollecitazione.

Generalmente, i rilievi necessari per stimare i parametri k e α sono eseguiti facendo brillare cariche di entità variabile e registrando, a distanze diverse, i valori della velocità di vibrazione indotti. I risultati delle misure sono quindi riportati su un diagramma bi-logaritmico che presenta la velocità di vibrazione sulle ordinate e la "distanza scalata" sulle ascisse. Interpolando i valori così graficizzati, si ottiene una retta di taratura del sito, che rappresenta un eccellente strumento previsionale, essendo tarata sulla situazione specifica ("legge sismica del sito"). Per quanto riguarda il quadro normativo, in Italia attualmente non abbiamo una Normativa specifica che correla i fenomeni di vibrazione impulsivi alle possibili lesioni sulle strutture. In ambito europeo si fa comunemente riferimento alla Normativa tedesca DIN4150 [4] e alla Normativa svizzera SN 640 312a [5]. Tali Normative forniscono i valori soglia limite delle coppie di valori velocità di vibrazione e frequenza, diversi per differenti tipologie di opera (Figure 2A e 2B).

DIN 1450

| Categoria | Tipo di struttura | Velocità di vibrazione (mm/s) | | | |
|-----------|---|-------------------------------|---------|-----------|---------------------------------------|
| | | Misura alla fondazione | | | Misura al pavimento dell'ultimo piano |
| | | Campi di frequenza (Hz) | | | Tutte le frequenze |
| | | <10 | 10 + 50 | 50 + 100* | |
| 1 | Edifici industriali e commerciali | 20 | 20-40 | 40-50 | 40 |
| 2 | Edifici residenziali | 5 | 5-15 | 15-20 | 15 |
| 3 | Strutture particolarmente sensibili (es. monumenti) | 3 | 3-8 | 8-10 | 8 |

*Per frequenze superiori ai 100 Hz si possono applicare i valori riportati in questa colonna
linea 1 è aumentata di un fattore 2 per strutture civili

SN 640 312a

| Classi di sensibilità | Classe di frequenza delle sollecitazioni | Valore massimo del vettore velocità V _g [mm/s] Frequenza dominante <30Hz* - 30-60Hz - >60Hz** | | |
|--------------------------|--|---|--|---------|
| | | < 30 Hz | 30 Hz - 60 Hz | > 60 Hz |
| 1) molto poco sensibile | occasionale | sino al triplo dei valori corrispondenti alla classe di sensibilità 3). | | |
| | frequente | | | |
| | permanente | | | |
| 2) poco sensibile | occasionale | sino al doppio dei valori corrispondenti alla classe di sensibilità 3). | | |
| | frequente | | | |
| | permanente | | | |
| 3) normalmente sensibile | occasionale | 15 mm/s | 20 mm/s | 30 mm/s |
| | frequente | 6 mm/s | 8 mm/s | 12 mm/s |
| | permanente | 3 mm/s | 4 mm/s | 6 mm/s |
| | 4) particolarmente sensibile | occasionale | Compresi tra i valori della Classe 3) e la loro metà | |
| frequente | | | | |
| permanente | | | | |

2A e 2B. Le velocità tollerabili in funzione della frequenza (DIN 1450 e SN640 312a)

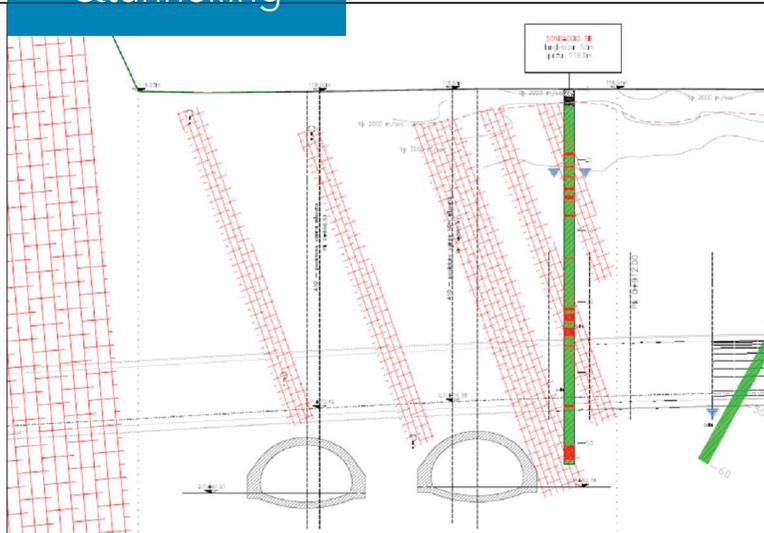
L'INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOTECNICO

La galleria Borzoli-Erzelli fa parte delle opere previste dal Comune di Genova per collegare la viabilità presente in località Borzoli, presso il campo sportivo comunale, con quella della località Erzelli (Figura 1).

La sezione stradale corrente è costituita da due corsie di larghezza 3,50 m e due banchine di larghezza 1,25 m, mentre il raggio interno di calotta della galleria, che misura 120 m² di sezione di scavo, è pari a 6,0 m. Dal punto di vista geologico, l'opera interessa una formazione di metabasalti che presenta differenti gradi di fratturazione. In corrispondenza della PK 0+870 la galleria Borzoli-Erzelli sovrappassa le canne della già esistente galleria autostradale Don Guanella (Autostrada A10), con un angolo d'incidenza di circa 36° e un franco minimo di circa 6 m. Qui, anche alla profondità dell'interferenza, le indagini eseguite hanno evidenziato diversi passaggi tettonizzati e un marcato peggioramento delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso rispetto ai tratti limitrofi. L'insieme dei dati raccolti ha permesso d'inquadrare qualitativamente l'ammasso nel tratto del sovrappasso come da mediamente a molto fratturato, con locali settori tettonizzati di spessore limitato (Figura 3).

Le indagini condotte hanno indagato anche lo stato di salute della preesistente galleria Don Guanella, allo scopo conoscere la tipologia, la resistenza e gli spessori di rivestimento definitivo, nonché approfondire lo stato tensionale esistente all'interno dello stesso e nell'ammasso al contorno dell'opera. In particolare si sono eseguiti:

- indagini georadar lungo l'intero sviluppo dell'interferenza;
- carotaggi continui entro il rivestimento definitivo e prove di compressione monoassiale;

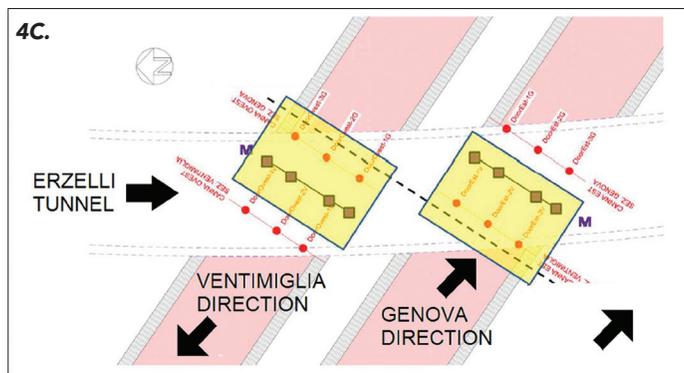
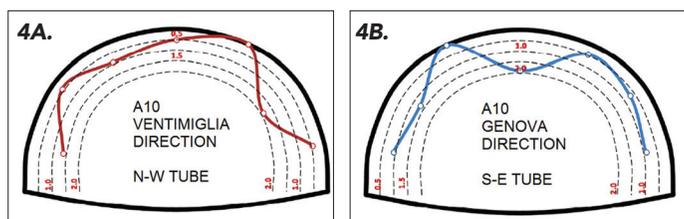


3. La ricostruzione geologica in corrispondenza dell'interferenza

- carotaggi continui eseguiti radialmente nell'ammasso di lunghezza pari a 6 m e prove dilatometriche;
- prove di martinetto piatto e sovracarotaggi con celle di carico, al fine di determinare lo stato di sollecitazione del rivestimento definitivo.

Le indagini effettuate a partire dalle canne della galleria Don Guanella, oltre a consentire un opportuno approfondimento geologico, hanno consentito di ricostruire lo spessore dei rivestimenti e lo stato tensionale medio all'interno della struttura (Figure 4A, 4B e 4C).

Per quanto riguarda lo stato di consistenza della struttura, le indagini hanno evidenziato una forte variabilità di risultati confermando uno stato di conservazione non ottimale, come già riscontrato dai primi sopralluoghi visivi. In particolare, le prove di compressione monoassiale svolte all'interno della galleria hanno mostrato la presenza di diverse zone di calcestruzzo ammalorato, registrando resistenze massime a compressione talvolta limitate addirittura a 3 MPa, a fronte di spessori di rivestimen-



4A, 4B e 4C. La ricostruzione dello stato tensionale all'interno dei rivestimenti

to medi dell'ordine di 50-60 cm. Le indagini georadar, d'altra parte, hanno evidenziato una problematica non attesa, ovvero la presenza, immediatamente a tergo dei rivestimenti di calotta, di cavità di forma irregolare e dimensioni non trascurabili, aventi continuità in direzione longitudinale alle canne della galleria Don Guanella. Tale aspetto costituiva una evidente criticità, trovandosi le cavità in prossimità della sagoma della galleria da scavare. In particolare, si profilava la possibilità che le vibrazioni indotte dallo sparo delle volate potessero indurre una concentrazione localizzata d'incrementi tensionali sul rivestimento ammalorato della galleria Don Guanella, e la caduta sullo stesso di cunei rocciosi dalla stabilità precaria.

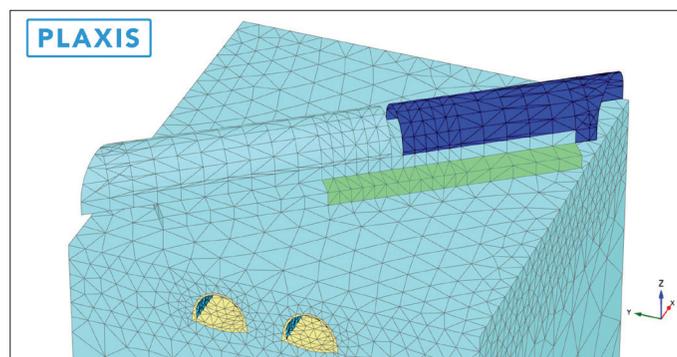
LA FASE PROGETTUALE

In fase progettuale, occorre risolvere una duplice problematica: da un lato, gli effetti tensionali dello scavo della galleria Borzoli-Erzelli sulla struttura della preesistente galleria Don Guanella, dall'altro gli effetti vibrazionali prodotti su quest'ultima dal sistema d'abbattimento del fronte, mediante esplosivo, adottato per l'avanzamento della prima.

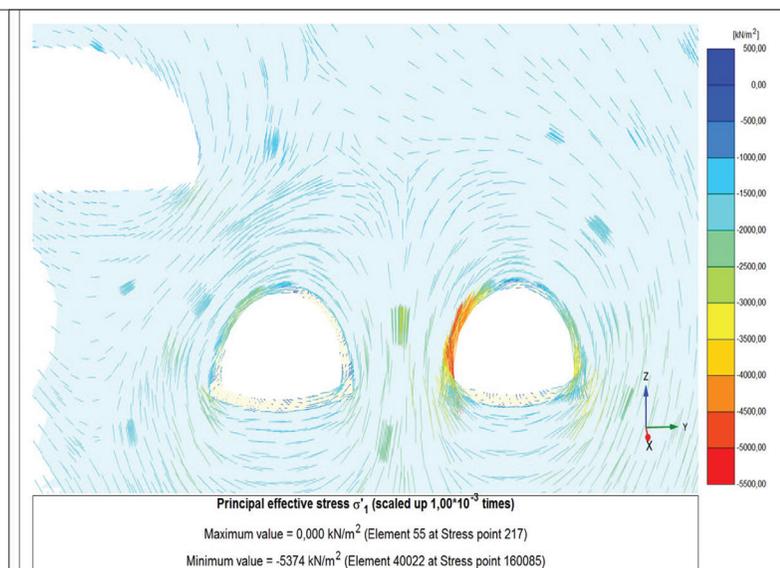
Per quanto riguarda il primo aspetto, la complessità della situazione ha indotto ad affrontare lo studio progettuale con l'ausilio di un modello tridimensionale di calcolo non lineare agli elementi finiti (Figura 5).

Per poter calcolare gli effetti dello scavo della galleria Borzoli-Erzelli sulla galleria preesistente a partire da una corretta configurazione tenso-deformativa, si è ricostruito innanzitutto, nel modello, basandosi sulle risultanze delle prove geomecniche e delle delle indagini eseguite in situ, lo stato tensionale preesistente. A questo scopo, si è dapprima simulato numericamente l'avanzamento delle canne dell'esistente galleria Don Guanella, quindi lo scavo della realizzanda galleria Borzoli-Erzelli. Le analisi numeriche hanno evidenziato che, a seguito dell'avanzamento della galleria Borzoli-Erzelli, si sarebbe prodotto un incremento tensionale dell'ordine di 5 MPa in corrispondenza delle reni della galleria autostradale Don Guanella (Figura 6).

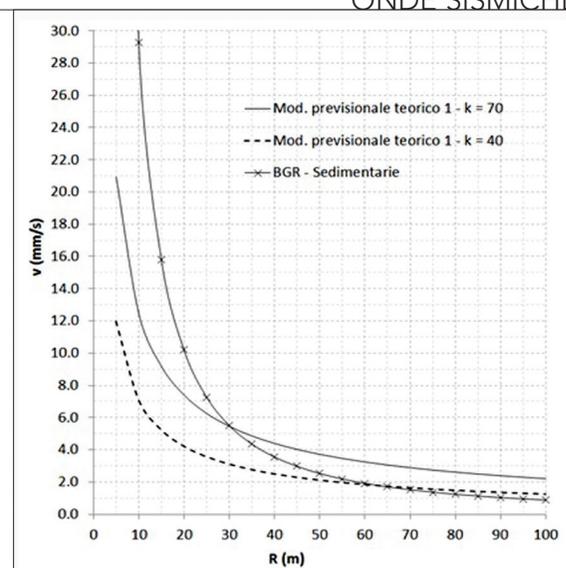
Tale incremento non sarebbe stato compatibile con lo stato di consistenza della sua struttura, soprattutto alla luce del vincolo del mantenimento dell'esercizio della galleria durante i lavori di sovrappasso. In tali condizioni operative non è certamente



5. Il modello tridimensionale di calcolo non lineare agli elementi finiti



6. Il modello di calcolo: lo stato tensionale nei rivestimenti



7. Le curve previsionali teoriche

possibile, infatti, accettare rotture di alcun tipo, neppure locali, del rivestimento onde evitare distacchi di materiale.

Per quanto concerne l'aspetto vibrazionale, nella situazione analizzata, le Normative di riferimento indicano per le frequenze tipiche dello scavo (superiori ai 50 Hz) velocità vibratorie massime compatibili estremamente ridotte, con valore limite minore di 10 mm/s. Solamente eseguendo appropriati rinforzi strutturali all'interno delle canne della galleria Don Guanella, atti a limitarne la sensibilità, si sarebbero potute accettare velocità superiori, dell'ordine di 20 mm/s.

Ai fini del dimensionamento di massima durante la fase progettuale si sono considerate le curve teoriche disponibili in letteratura, non essendo ancora disponibili dati ricavati in situ.

Poiché le indicazioni ricavate dalle sole curve teoriche in tale settore costituiscono unicamente una prima stima delle velocità di vibrazione (non tenendo conto delle caratteristiche specifiche del sito, della posizione reciproca tra fonte e interferenza, delle disposizioni geometriche delle cariche ecc.), a livello progettuale si è previsto, come vedremo, un opportuno sistema di monitoraggio vibrazionale in corso d'opera, al fine di tarare, mediante opportuni modelli sperimentali, la legge specifica del sito ed eventualmente intervenire per adattare gli interventi predisposti. Dallo studio condotto sulla base delle sole curve teoriche (Figura 7), ricavate considerando varie formulazioni dei coefficienti, tra cui quella fornita dal BGR tedesco (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe - Federal Bureau for Mine and Raw Material), è emersa la necessità di adottare, per un tratto di circa 100 m a cavallo dell'interferenza, una quantità di esplosivo detonante contemporaneamente pari a circa 1,0 kg.

Se si considera che in assenza di interferenze lo scavo della tratta di galleria lato Borzoli, nel medesimo contesto geomeccanico si è proceduto con un quantitativo di esplosivo detonante contemporaneamente compreso tra i 10 e 20 kg circa, è evidente quanto sia limitato questo valore, che ha richiesto di studiare volate con adeguati microritardi, riducendo i volumi abbattuti ad ogni volata. Considerando le evidenze emerse dalle analisi numeriche e le problematiche dovute agli aspetti vibrazionali, si sono finalmente definiti gli interventi da adottare in prossimità dell'interferenza.

In particolare, si è previsto che l'avanzamento potesse procedere a piena sezione (approccio ADECO-RS) [6] senza particolari accorgimenti sino a circa 100 m dall'interferenza.

Da qui sino a 30 m dall'interferenza, si sarebbe proceduto sempre a piena sezione, regolando la quantità di esplosivo detonante istantaneamente in funzione delle risultanze di un sistema di monitoraggio vibrazionale opportunamente predisposto all'interno delle canne della galleria Don Guanella.

Per lo scavo a cavallo dell'interferenza si sono prescritti i seguenti interventi cautelativi:

- avanzamento con sfondi massimi pari a 1,20 m, installando un priverestimento costituito da una coppia di profili IPN 160 e 20 cm di spritz-beton;
- riduzione della sezione d'avanzamento, ottenuta facendo avanzare alternativamente la porzione di calotta e quella di strozzo. Questo, oltre a permettere di avanzare utilizzando più limitate quantità di esplosivo detonante istantaneamente, permetteva anche di aumentare di circa 3 m la distanza del fronte d'avanzamento dall'interferenza durante la volata principale. Lo scavo della porzione inferiore e l'immediato getto del solettone di base, prescritti a distanza sempre inferiore a 15 m dal fronte, garantivano comunque la pronta chiusura del cavo, fondamentale per limitare le deformazioni;
- eventuale preconsolidamento del terreno al di sotto della galleria da scavare, da operarsi nelle zone d'ammasso particolarmente fratturato, individuate di volta in volta con l'ausilio di appropriate prospezioni geofisiche lanciate in avanzamento;
- riempimento delle cavità esistenti a tergo del rivestimento della galleria Don Guanella mediante iniezioni di resine poliuretatiche espansive eseguite dall'interno delle canne della stessa;
- rinforzo del rivestimento della galleria Don Guanella mediante incorporazione nello stesso di profilati metallici a omega (30 centine per ciascuna canna) e posa di un manto di 8 cm di spritz-beton armato con rete metallica (Figure 8A e 8B). Tale rinforzo avrebbe consentito di innalzare le soglie di attenzione e di allarme delle velocità vibratorie rispettivamente a 16 mm/s e 20 mm/s.

LA FASE OPERATIVA E IL MONITORAGGIO

Mentre lo scavo della galleria Borzoli-Erzelli procedeva normalmente a piena sezione, nella zona dell'interferenza si sono operati gli interventi di consolidamento e rinforzo previsti per la galleria Don Guanella.

I vuoti a tergo del rivestimento della canna di quest'ultima sono stati parzialmente riempiti mediante iniezioni progressive di resine poliuretatiche espansive effettuate attraverso piccole perforazioni praticate in calotta nel rivestimento di calcestruzzo, in modo da un disturbare il meno possibile la struttura esistente.

La corretta esecuzione dell'intervento veniva verificata attraverso apposite telecamere introdotte nei fori di perforazione.

L'intervento di rinforzo del rivestimento si è operato durante le ore notturne interrompendo il traffico veicolare per brevi periodi di tempo sulla sola canna interessata.

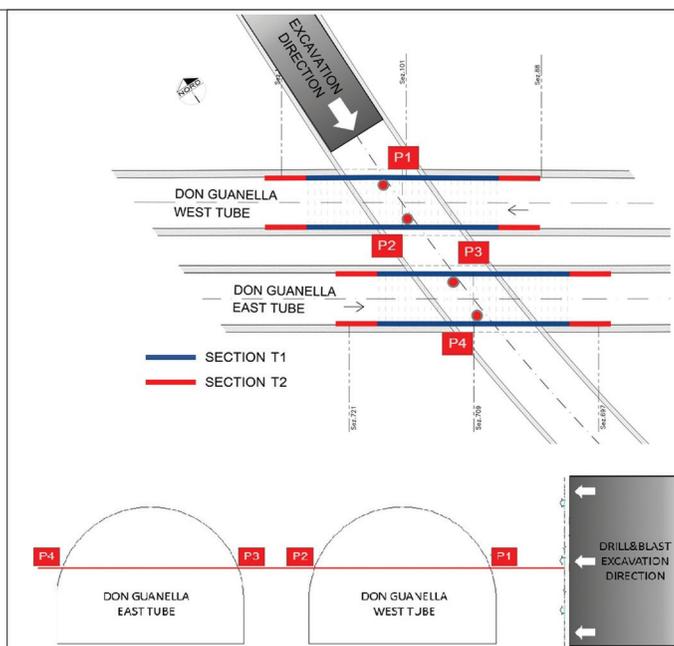
Contemporaneamente, nella zona dell'interferenza si è predisposto il sistema di monitoraggio previsto dal progetto per tenere sotto controllo gli effetti tensionali e vibrazionali dell'avanzamento della galleria Borzoli-Erzelli sulla struttura dell'esistente galleria Don Guanella.

Per il controllo degli effetti tensionali si è installata una sezione di monitoraggio sulle centine metalliche di rinforzo strutturale e due sezioni sui rivestimenti in calcestruzzo, ognuna delle quali composta da tre coppie di barrette estensimetriche.

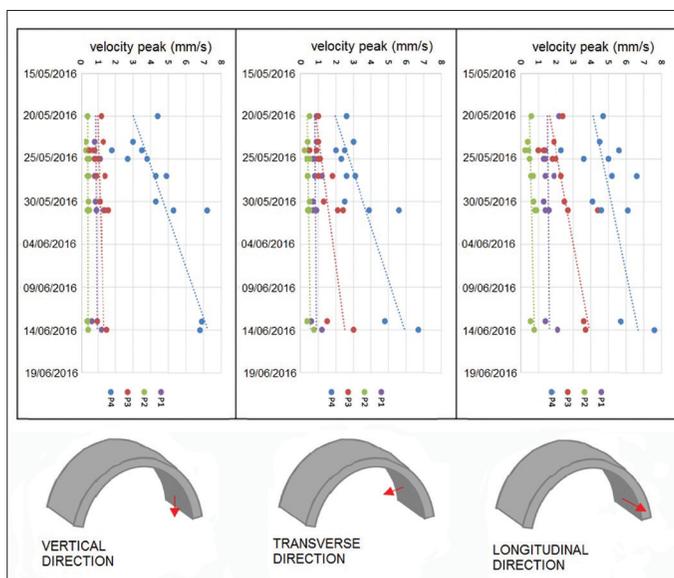
Per il controllo degli effetti vibrazionali, all'interno di ciascuna canna della galleria Don Guanella, nella zona dell'interferenza, sono stati installati due sensori vibrazionali atti a registrare le caratteristiche del moto vibrazionale in termini di frequenza dominante e velocità di vibrazione nelle tre direzioni, trasversale, longitudinale e verticale rispetto alla direzione di propagazione del moto stesso.

La posizione dei sensori (Figura 9) è stata scelta sulla base delle evidenze del modello numerico tridimensionale con riferimento alla differente posizione, rispetto alla fonte della vibrazione, dei paramenti della galleria e delle evidenze emerse dalle analisi sul modello tridimensionale, dalle quali era emerso come, dal punto di vista tensionale, le situazioni maggiormente gravose fossero in corrispondenza dei piedritti della galleria.

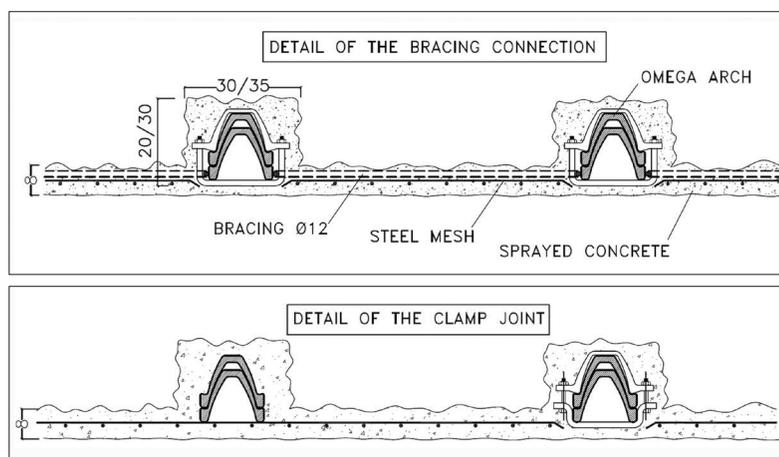
Le volate sono caratterizzate da una carica istantanea Q (kg) e da una distanza R rispetto a ciascun sensore.



9. La posizione dei sensori vibrazionali rispetto alla sagoma della galleria Don Guanella



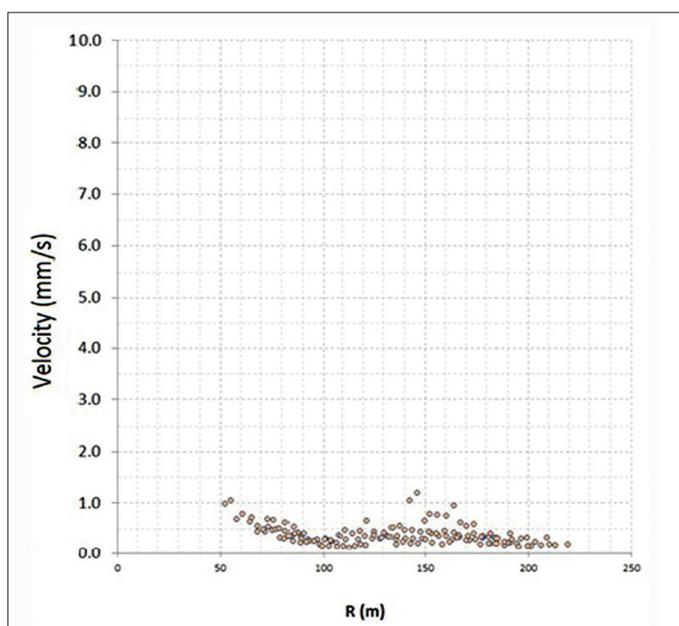
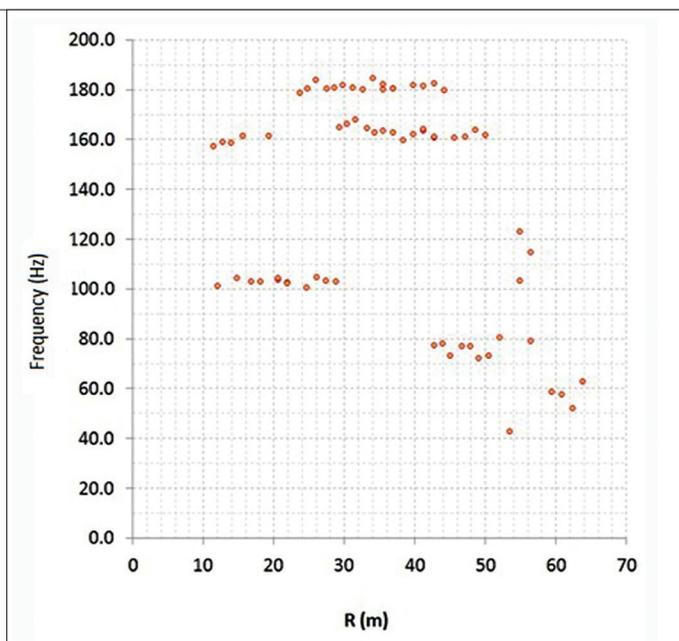
10. Le velocità registrate da ciascun sensore



8A e 8B. L'intervento di rinforzo strutturale in intradosso

Per ogni sfondo effettuato, quindi, si sono registrate quattro coppie di valori di velocità v e frequenza f , ciascuna delle quali relativa a una coppia di valori Q , R , con R variabile per ciascun sensore date le geometrie in esame (Figura 10). Una volta giunti col fronte della galleria a meno di 100 m dalla zona d'interferenza, lo scavo è proseguito a piena sezione come previsto dal progetto, regolando la quantità di esplosivo detonante istantaneamente (e conseguentemente la profondità degli sfondi) sulla base dei valori misurati dal sistema di monitoraggio sopra illustrato.

A circa 30 m dalla zona dell'interferenza l'avanzamento è proseguito a sezione ridotta, con tutte le cautele previste dal progetto e sopra illustrate finché, superata l'interferenza, l'avanzamento ha potuto gradualmente essere ripreso secondo le normali modalità.

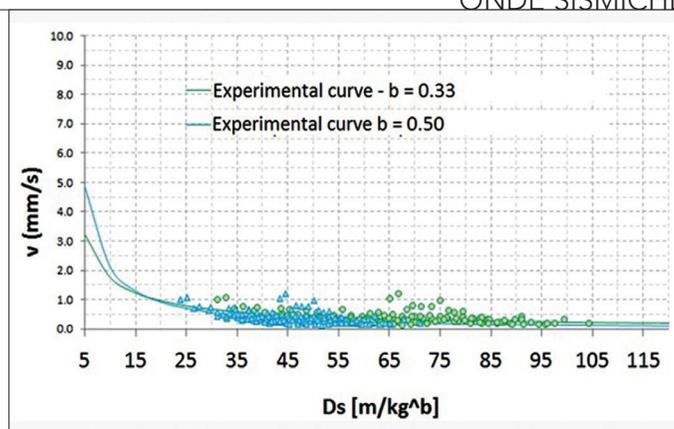


11A e 11B. Velocità e frequenze registrate fino a 50 m dall'interferenza

È interessante commentare brevemente i risultati del monitoraggio realizzato all'interno delle due canne della galleria Don Guanella al passaggio del fronte della galleria Borzoli-Erzelli e l'applicazione dell'approccio sperimentale, cui si è precedentemente accennato, che si è utilizzato per valutare e prevedere l'effetto indotto dallo scavo con esplosivo sulle due canne della galleria Don Guanella.

Per quanto riguarda il monitoraggio tensionale, i dati registrati hanno mostrato un'ottima corrispondenza con quelli previsti dalla modellazione numerica: gli incrementi tensionali maggiori sui rivestimenti si sono registrati in corrispondenza delle reni e dei piedritti, con valori massimi indicanti un incremento delle compressioni prossimo a 3 MPa. Sulle centine metalliche si sono registrate compressioni massime dell'ordine di 15 MPa.

Riguardo al monitoraggio vibrazionale, nelle Figure 11A e 11B sono riportati tutti i valori di frequenza e velocità massima registrati durante lo scavo fino alla distanza di 50 m circa dall'interferenza.



12. Le curve previsionali ottenute con il metodo della distanza scalata ($R > 50$ m)

Si noti come le frequenze desunte per distanze inferiori ai 100 m, laddove si sono adottate quantità di esplosivo progressivamente inferiori, siano risultate più alte. Questo risulta un ulteriore vantaggio dal punto di vista degli effetti indotti dalle vibrazioni: a frequenze maggiori anche le Normative di riferimento indicano infatti limiti di velocità ammissibili maggiori.

L'elaborazione dei dati misurati ha consentito di tracciare curve previsionali della velocità di vibrazione in funzione della distanza R tra punto di scoppio e punto di misura.

Al fine di determinare i coefficienti k e α previsti dalla formulazione del modello sperimentale, i valori dei dati misurati v , R , Q sono graficizzati nel piano bi-logaritmico $\log(v) - \log(Ds)$.

I valori dei coefficienti così determinati sono pari a:

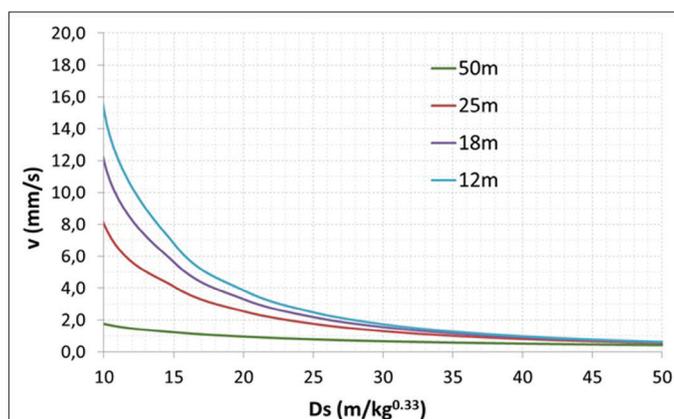
$$k = 10^{1,119} = 13,16; \alpha = -0,873 \text{ per } \beta = 1/3 \quad (4)$$

$$k = 10^{1,525} = 33,47; \alpha = -1,199 \text{ per } \beta = 1/2 \quad (5)$$

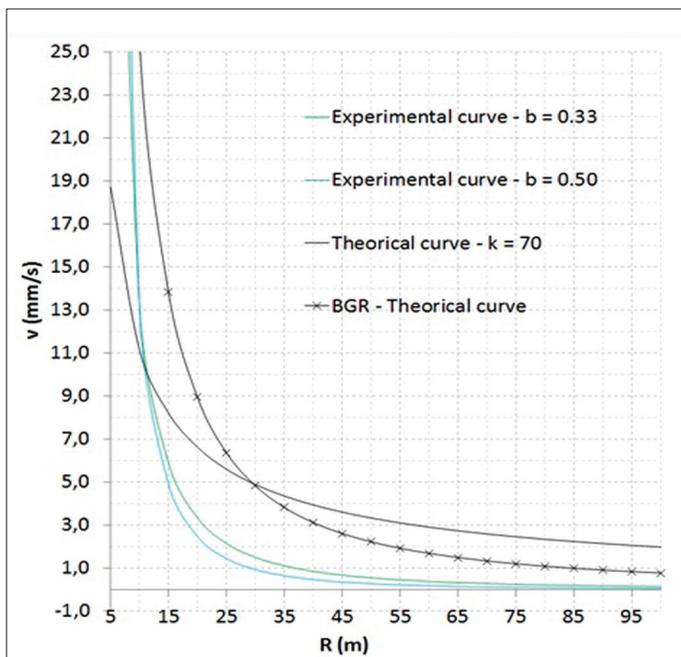
La Figura 12 mostra come i dati di velocità di vibrazione v misurati siano ben interpolati dal modello sperimentale, nell'intervallo di distanza scalata Ds indagato.

Le curve tracciate hanno permesso di seguire l'evolversi degli effetti vibrazionali al diminuire della distanza dall'interferenza e di valutare se intervenire modificando gli schemi di volata.

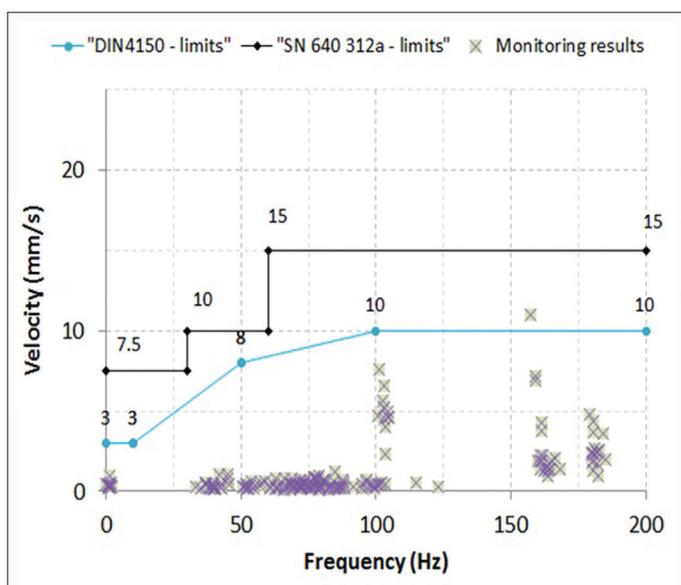
Tale procedura è stata ripetuta iterativamente per ogni sfondo eseguito in modo da migliorare la confidenza dei dati sperimentali in particolar modo a breve distanza. La Figura 13 in-



13. Le curve previsionali ottenute a varie distanze dall'interferenza



14. Il confronto tra le curve teoriche e sperimentali



15. Il confronto tra i valori ottenuti e i limiti normativi

dica come le curve previsionali in caso di misura fino a 50 m di distanza sottostimassero le velocità ottenute nel proseguo degli scavi, mentre il modello previsionale sperimentale valutato implementando le misure fino a 25-30 m ha mostrato un buon grado di affidabilità.

La Figura 14 riporta il confronto tra la "legge specifica del sito" ottenuta sperimentalmente e le curve teoriche adottate in fase di progetto.

Le formulazioni presenti in letteratura indicano in linea generale una velocità massima maggiore, a parità di distanza, da quanto ottenuto sperimentalmente, mentre si nota come nel caso in esame l'adottare i due diversi valori di β non ha comportato differenze sostanziali.

In Figura 15 sono riportati tutti i dati ottenuti dal monitoraggio sino al termine degli scavi. Si precisa che nel tratto di sovrappasso sono state adottate cariche istantanee variabili tra 0,8-5,0 kg, ottenendo una velocità di vibrazione massima pari a 11 mm/s ad una distanza di circa 10 m tra lo scavo ed il sensore vibrometrico. Si noti come grazie all'approccio impiegato si sia riusciti a superare tutte le criticità presenti, ottenendo, anche dal punto di vista vibrazionale, risultati inferiori ai cautelativi limiti assunti a progetto. Tali valori, ampiamente inferiori ai limiti di Normativa, hanno consentito di mantenere in esercizio le due canne della galleria autostradale Don Guanella per tutta la durata delle lavorazioni.

CONCLUSIONI

L'avanzamento in galleria mediante esplosivo ("Drill&Blast") produce la propagazione di onde sismiche con conseguenti fenomeni di vibrazione nella massa rocciosa circostante, interferendo con strutture o infrastrutture preesistenti, come nel caso dello scavo della galleria stradale "Borzoli-Erzelli, il cui tracciato prevedeva il sovrappasso dell'esistente galleria a doppia canna Don Guanella (A10) con un franco di soli 6 m. Le indagini preliminari condotte sulle strutture di quest'ultima avevano evidenziato un cattivo stato conservativo del rivestimento, richiedendo di rispettare limiti di velocità della propagazione delle onde sismiche assai più severi rispetto agli standard di riferimento abituali e di eseguire lavori preventivi di rinforzo strutturale delle due canne del tunnel.

Al fine di prevedere gli effetti a breve distanza causati dallo scavo mediante esplosivo e valutare le azioni necessarie per garantire il minimo impatto sull'interferenza, sono stati adottati diversi modelli di previsione, sia teorici che sperimentali. L'elaborazione dei dati di monitoraggio delle vibrazioni, registrati durante l'avanzamento del fronte, ha permesso di determinare una previsione accurata di tali effetti, permettendo di progettare lo schema della volata più appropriato per consentire il sovrappassaggio in sicurezza dei tunnel interferenti. ■

(1) *Ingegnere, Amministratore Delegato di Rocksoil SpA*

(2) *Ingegnere, Project Manager di Rocksoil SpA*

(3) *Ingegnere, Progettista di Rocksoil SpA*

(4) *Geometra, Direttore di Cantiere di COCIV*

(5) *Ingegnere, Responsabile della progettazione di COCIV*

Bibliografia

- [1]. C. Jannello, G. Ceppi, P. Lunardi, G. Siotto - "Vibrazioni indotte dallo scavo della galleria Capo Verde a Sanremo", International Congress on Large Underground Openings, Florence, pp. 725-733, 1986.
- [2]. P. Berry, E.M. Dantini - "Criteri di stima e di controllo della sismicità indotta da scavi con esplosivo", International Congress on Large Underground Openings, Vol. II, Florence, pp 500-505, 1986.
- [3]. A.G. Fabbri - "Fenomeni vibratorii indotti da volate e demolitori", Thesis (PhD in Engineering geology), Università degli studi di Bologna, p. 215, 2015.
- [4]. SN 640312a: "Effet des vibrations sur les constructions", Aprile 1992.
- [5]. DIN 4150-3: Effects of vibration on structures, 1999.
- [6]. P. Lunardi - "Progetto e costruzione di gallerie - Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS)", Hoepli, 2006.