



PRESSIONI IN ARIA E SISMI INDOTTI IN OPERE SOTTERRANEE DA VOLATE IN GALLERIA

P. Berry¹, E.M.Dantini², P. Lunardi³

SOMMARIO

La ricerca sperimentale, i cui risultati sono descritti e discussi in questa memoria, è stata rivolta a valutare l'efficacia di discontinuità, prodotte nel massiccio roccioso con una tagliatrice a catena, per attenuare l'azione sismica generata dallo scavo con esplosivo di una galleria su un'altra preesistente. Il controllo strumentale dei livelli raggiunti dalle vibrazioni indotte nell'ammasso roccioso e dalle pressioni dell'aria all'interno della galleria in corso di realizzazione ha messo in evidenza la notevole influenza dei pretagli.

1. PREMESSA

La realizzazione di scavi in sottoterraneo, con la tecnica della perforazione e detonazione di cariche esplosive confinate in foro (D & B), induce molteplici fenomeni indesiderati [1], [2] o quantomeno da tenere sotto controllo, che a volte assumono livelli di importanza tali da mettere a rischio l'incolumità dei minatori, la stabilità stessa dell'opera in costruzione, l'integrità di opere (naturali o manufatti) sotterranee e di quelle poste in superficie che subiscono gli effetti dello scavo in corso di realizzazione [3].

Tra tutti i fenomeni associati alla tecnica di scavo "D & B", la sismicità, indotta dalla detonazione dell'esplosivo, è il fenomeno più noto ed il suo controllo pone un vasto spettro di problemi poiché le caratteristiche del sisma dipendono da numerosi parametri quali, ad esempio, l'ubicazione dello sparo (cielo aperto o sottoterraneo) e la posizione di ciò che si vuole tutelare (in superficie o nel sottosuolo). La letteratura tecnica e scientifica è ricca di casi nei quali la sorgente di sismi e le strutture da salvaguardare sono entrambe in superficie; pertanto, il tecnico ha a disposizione innumerevoli indicazioni ed elementi di giudizio per risolvere i più diversi tipi di problemi.

Sono molto meno numerosi gli studi dedicati alle relazioni intercorrenti tra sismi, generati per la realizzazione di costruzioni in sottoterraneo, e preesistenti scavi, manufatti o strutture naturali in sottosuolo o in superficie [1]. In questo caso, l'ingegnere specialista non solo ha a disposizione un adeguato numero di esempi applicativi, ma si può avvalere anche di Norme, quali ad esempio quelle svizzere, che tuttavia regolano per lo più tipologie di sparo superficiali (sorgente) e nelle quali gli oggetti da tutelare sono limitati a manufatti per uso

civile ed industriale e a monumenti.

La relativa esiguità delle ricerche scientifiche, delle descrizioni di casi pratici e l'assenza di Norme è da attribuire alla bassa frequenza con cui si usa l'esplosivo nelle situazioni o configurazioni con la sorgente della sismicità posta nel sottosuolo che, peraltro, danno luogo a fenomenologie che rendono laboriosa la progettazione del programma di misure e complessa l'interpretazione dei processi sismici. Le difficoltà in fase di progetto ed in fase di analisi dei dati acquisiti sono da attribuire al numero notevole di tipologie dei manufatti da proteggere ed ai rapporti geometrici (che evolvono nel corso dello scavo) tra sorgente del sisma e struttura.

La sismicità generata su gallerie limitrofe, dalle cariche confinate in foro, è un fenomeno i cui parametri fisici (ampiezza degli spostamenti, frequenza, ecc.) sono condizionati dalle caratteristiche geologiche e geostrutturali dell'ammasso roccioso, dalla posizione reciproca dei due scavi (quello in fase di realizzazione e quello da tutelare), dal disegno della volata, dalla geometria della rinora, dalla serie e dalla sequenza dei tempi di ritardo [4], [5].

Generalmente, per condizionare i parametri fisici che caratterizzano il sisma indotto, si ricorre al frazionamento della carica e ad opportune configurazioni dei fori della rinora scegliendo tra le numerose ben note possibilità (rinora a ventaglio, a V, ecc.) [4]. Se ciò non è ritenuto sufficiente a garantire l'integrità dell'opera limitrofa, si ricorre alla parzializzazione della sezione di scavo [4] ed in alcuni casi si adotta lo scavo con demolitore idraulico abbandonando il metodo della "perforazione e sparo".

Con questa ricerca, che è parte di un vasto programma d'indagini in corso da alcuni anni e del quale si sono già illustrati i primi risultati conseguiti [6], è stata studiata la possibilità di ridurre il livello di alcuni tra i fenomeni più importanti, tra una galleria in fase di scavo ed una in esercizio, indotti dallo sparo delle mine, realizzando pretagli con tagliatrici meccaniche.

2. DESCRIZIONE DELLE OPERE E BREVE INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMECCANICO

Nella pianta di figura 1 sono schematizzati i tracciati della galleria preesistente da tutelare e di quella da realizzare. La prima (nella figu-



Sezione A-B

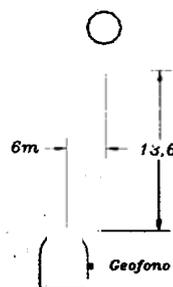
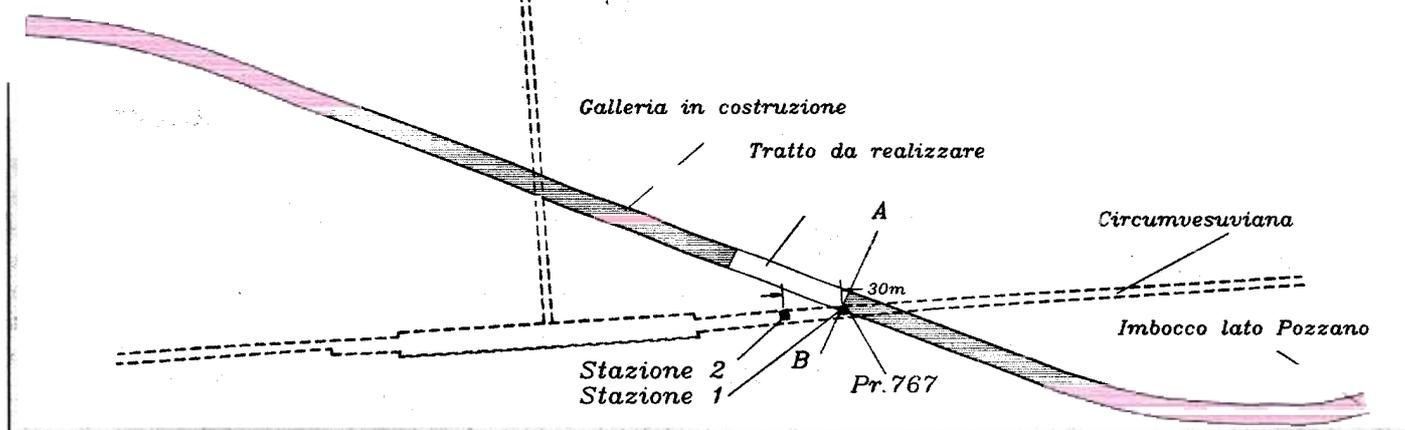


Fig. 1 - In Pianta è lo schema della galleria preesistente e di quella in costruzione in corrispondenza dell'interferenza. La sezione verticale indica la relazione spaziale tra le due opere. Nei due schemi è resa evidente la disposizione delle stazioni di misura nella galleria preesistente da tutelare (Circumvesuviana). I trasduttori tridimensionali di velocità delle particelle sono stati posizionati sulla parete con vincoli tali da renderli solidali ad essa.



ra è indicata in azzurro) è una delle opere di ingegneria della linea Circumvesuviana, mentre la galleria in costruzione (nella figura è indicata in rosso) è la galleria Pozzano che fa parte della costruenda variante alla Strada Statale 145 "Sorrentina" tra Pozzano e la galleria in esercizio di Seiano.

Si tratta di una galleria di circa 100 m² di sezione, complessivamente lunga 1039 m, a canna unica, caratterizzata da un'altezza che, in corrispondenza del vertice della calotta, raggiunge la misura di 9.2 m e da una larghezza ai piedritti di 12.5 m.

Essa, unitamente alla galleria Punta Orlando (già realizzata) ed alle gallerie Scrajo 1 e 2 (da completare), interessa la penisola Sorrentina correndo parallelamente alla costa nord occidentale (lato golfo di Napoli) tra Castellammare e Vico Equense.

Detta penisola dal punto di vista geologico costituisce un alto strutturale orientato in direzione E-NE - O-SO, delimitato a Nord dalle depressioni tettoniche della piana Campana e a Sud da quelle del golfo di Salerno.

L'ossatura di tale unità morfostrutturale è costituita da rocce carbonatiche di età mesozoica, cui si sovrappongono formazioni terrigene mioceniche e coperture quaternarie clastiche, unitamente a prodotti piroclastici pleistocenici legati all'attività del complesso vulcanico campano.

L'assetto tettonico in cui si rinvengono queste formazioni deriva da un sollevamento del complesso calcareo che si è manifestato con maggiore accentuazione dal lato del versante del golfo di Salerno rispetto al golfo di Napoli, per cui tutto l'insieme ha assunto una disposizione monoclinale con immersione 20° ÷ 30° verso N-NO.

Tale sollevamento differenziale, avvenuto molto rapidamente e probabilmente in tempi piuttosto recenti (tardo miocenico con prosecuzione fin nel Plio-Pleistocene), è alla base delle condizioni di disequilibrio con conseguenti scivolamenti delle coperture quaternarie in direzione N-NO che avvengono frequentemente nella zona.

Le linee tettoniche più importanti che si riscontrano sono quelle ad andamento appenninico che tagliano la penisola longitudinalmente con allineamenti NO-SE e quelle ad andamento trasversale rispetto alla dorsale appenninica (NE-SO) di cui fa anche parte la frattura beante di notevole estensione lineare nota come "Spacco della lala". La galleria, che corre ad una quota di circa 60 m s.l.m. con una copertura massima di 150 m, interessa il complesso calcareo della cosiddetta sezione inferiore (Lias-Creta), costituito da dolomie e calcari dolomitici di colore compreso tra il grigio e l'avana, con grana variabile da minuta a saccaroide in matrice micritica (wakestone).

L'ammasso è ben stratificato (con direzione N 250° ed inclinazione 15° ÷ 20°) con spessore degli strati variabile da 30 cm a 150 cm e mediamente fratturato con giunti continui per lo più piani con superfici lisce o poco scabre che si presentano generalmente ben serrate (principale famiglia N60° i = 60° ÷ 70° a spaziatura 50 cm) ma che a volte possono risultare aperte con aperture anche centimetriche e riempimento di materiale argilloso misto a depositi calcarei residuali. Le indagini condotte nella tratta di galleria da completare interessata dal cunicolo pilota, hanno permesso di definire alcuni parametri caratteristici dell'ammasso:

- resistenza a compressione uniassiale (valori riferiti alla matrice): 70 ÷ 150 Mpa;
- resistenza a trazione (determinata con prova indiretta "brasiliana"): 7 ÷ 15 Mpa;
- velocità onde longitudinali su provino (Vp media): 5300 m/s;
- indice di qualità dell'ammasso (R.M.R.): 59 (roccia discreta ÷ buona);
- resistenza media dell'ammasso (σ_{gd}): 11 Mpa.

La galleria Pozzano è stata fin qui realizzata in accordo al progetto Anas attraverso le seguenti fasi costruttive (fig. 2):

- realizzazione di un foro pilota di diametro 3.6 m, al fine di definire

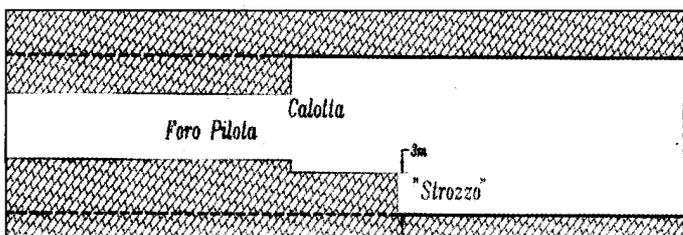


Fig. 2 Fasi di scavo: alla realizzazione del foro pilota è stato fatto seguire l'allargamento della sezione e, successivamente, a distanza opportuna, l'abbattimento dello strozzo.

l'ammasso in scavo attraverso la caratterizzazione proposta da Rabcewicz-Pacher e la conseguente determinazione delle sezioni tipo da utilizzare in fase di allargamento;

- realizzazione di consolidamenti da cunicolo, ove ritenuto necessario (in particolare nella tratta di interferenza con la galleria Circumvesuviana);
- allargamento realizzato con scavo a mezza sezione e successivo ribasso, mediante uso di esplosivo (in prossimità della galleria Circumvesuviana lo sparo era controllato al fine di rispettare la velocità massima consentita per la sismicità indotta dallo scavo individuata inizialmente in 10 mm/s) e la dove l'ammasso si presentava fratturato con utilizzo di demolitore idraulico;
- posa del priverivestimento costituito da centine doppie IPN180 a passo variabile 1.0 ÷ 1.4 m e spritzbeton armato con rete elettrosaldata a spessore variabile 10 ÷ 25 cm;
- rivestimento definitivo di calotta costituito da cls Rck 25 MPa avente spessore in chiave 80 cm e spessore al piede 125 cm;
- assenza di arco rovescio.

Con tale metodologia, lo scavo è avanzato procedendo su due imbocchi fino a giungere in corrispondenza dell'intersezione con la sottostante galleria Circumvesuviana, con un diaframma di roccia rimanente da abbattere di 62 m.

Nella figura 1 è rappresentata schematicamente la situazione; la sezione verticale A – B mostra la reciproca posizione delle due gallerie nel punto di massima vicinanza (in pianta corrisponde all'incrocio "virtuale" tra le due opere). La sezione indica che la componente orizzontale della distanza tra i due assi dei manufatti è limitata a soli 6 m e la componente verticale della distanza tra il piano di calpestio della costruenda galleria e la calotta dell'opera preesistente è ridotta a soli 13.6 m.

In corrispondenza di tale progressiva si registravano in corrispondenza della volta della galleria Circumvesuviana una lesione longitudinale e distacchi di intonaco.

A seguito di ciò veniva sospeso l'avanzamento e veniva individuato in 6 mm/s il nuovo valore di soglia per la velocità vettoriale indotta dal sisma.

Conseguentemente veniva impostato un programma di prove al fine di verificare la possibilità di utilizzo dell'esplosivo nel rispetto del valore di soglia individuato.

3. METODOLOGIA DI MISURA ADOTTATA

La distanza estremamente ridotta, tra il manufatto da salvaguardare e i cantieri di avanzamento dello scavo, ha imposto lo sviluppo di un programma di prove molto articolato con il ricorso a quantitativi limitati di esplosivo. Sono stati studiati i problemi che sarebbero derivati dall'allargamento della sezione e dall'esecuzione dello "strozzo".

Per l'ampliamento della sezione, il programma ha analizzato l'influenza del preforo sulla propagazione della fenomenologia sismica. Con il rilievo sismico sono state effettuate, nell'ambito del programma di ricerca, concomitanti misure dell'aumento di pressione dell'aria causato dalla detonazione delle cariche di esplosivo nella realizzando galleria.

La figura 1 indica la posizione, all'interno della galleria FS, dei geofoni tridimensionali, rilevatori delle vibrazioni indotte; questi erano caratterizzati da una frequenza propria di 8 Hz, e sono stati connessi alle stazioni di registrazione mediante cavi schermati multipolari. I geofoni sono stati vincolati solidalmente alla parete della galleria (come è indicato nella sezione verticale della figura 1) con staffe d'acciaio.

I risultati del programma d'indagini sperimentali sono riportati nelle figure, di seguito commentate, i cui diagrammi fanno riferimento ai valori del vettore velocità delle particelle ottenuti con le seguenti condizioni di sperimentali:

a) detonazione di cariche sperimentali sul fronte della galleria, per analizzare i fenomeni connessi con l'allargamento della sezione. Le cariche erano confinate in fori realizzati a sinistra (guardando il fronte in avanzamento) del foro pilota che, quindi, non era frapposto tra le sorgenti dei sismi ed i geofoni. In questa configurazione non si è adottato il pretaglio (fig. 3), pertanto con questa serie di spari si sono studiate le caratteristiche della sismicità diretta;

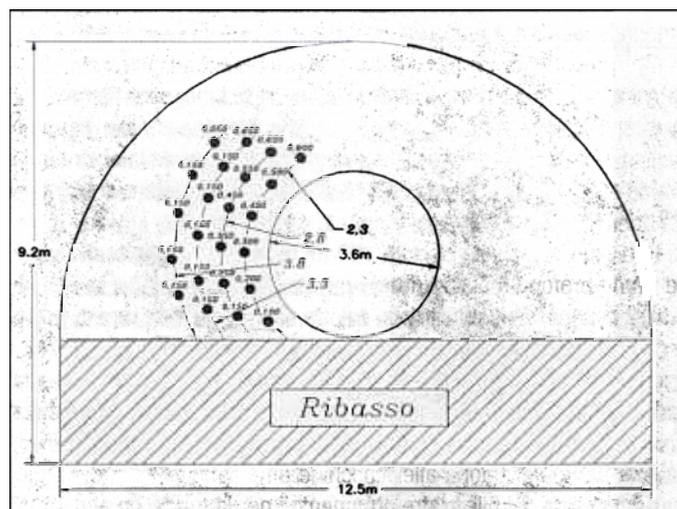


Fig. 3 Cariche sperimentali sul fronte della galleria, detonate in assenza di giunti artificiali, per l'analisi dei fenomeni indotti dall'allargamento della sezione. Nello schema è indicata la distanza dei fori da mina dalla parete del foro pilota ed i quantitativi di esplosivo adottati in ciascun foro, espressi in kg. Il numero d'ordine con cui sono detonate le cariche è indicato nella figura 4.

b) detonazione di cariche esplosive, con il proposito di misurare la sismicità prodotta dall'allargamento della sezione, confinate nei fori realizzati a destra del foro pilota (fig. 4) che, quindi era interposto tra le cariche ed i trasduttori. Anche in questa seconda configurazione non si è adottato il pretaglio;

c) detonazioni tese a studiare i fenomeni connessi con l'allargamento della sezione. Queste cariche erano confinate in fori realizzati a sinistra del foro pilota, che quindi era poco influente ai fini della propagazione dei sismi indotti. Tuttavia, la caratteristica fondamentale di questa serie di spari era che lungo la congiungente sorgente dei sismi – geofoni erano stati interposti i giunti artificiali (fig. 4);

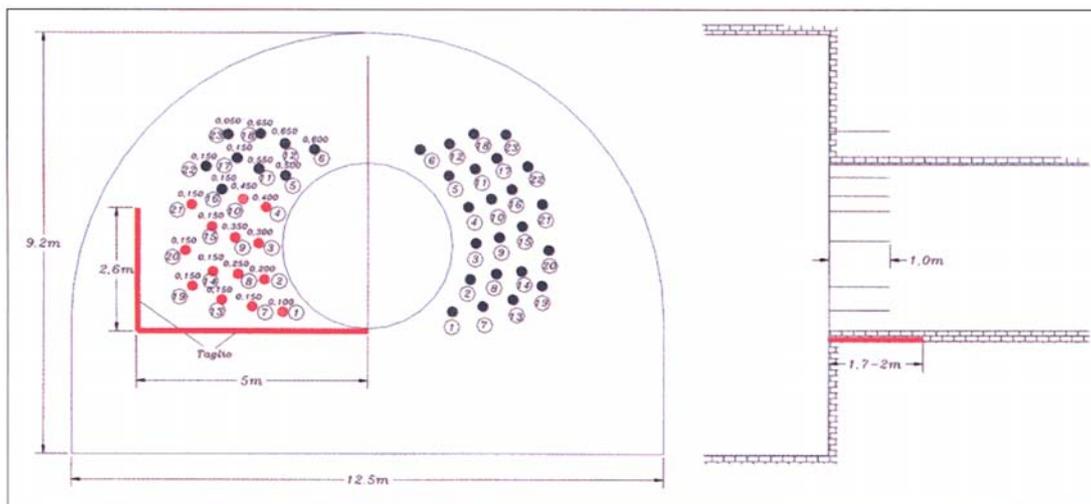


Fig. 4 - Disposizione geometrica e ordine di brillamento delle mine in calotta a destra ed a sinistra del foro pilota. A sinistra, la sismicità dei fori "rossi" è stata attenuata dal pretaglio, mentre quella degli altri è stata amplificata. Una notevole riduzione di sismicità (fori di destra) è collegabile alla presenza del foro pilota, che ha "funzionato" come discontinuità artificiale nei confronti della propagazione delle onde sismiche in direzione della galleria da salvaguardare.

d) detonazione di cariche confinate in fori verticali, realizzati al piede della galleria, per analizzare i fenomeni connessi con la realizzazione del ribasso di 3 m, in assenza del pretaglio;

e) configurazione di sparo sperimentale identica a quella del punto precedente e per gli stessi scopi ma con l'interposizione di giunto artificiale tra sorgente dei sismi e geofoni;

I "pretagli" o "giunti artificiali", avevano apertura di 4 cm ed erano profondi da 1.7 m a 2.0 m e sono stati realizzati, come indicato nello schema di

figura 4, in direzione dello sviluppo dello scavo, sia secondo un piano verticale (per una estensione di 2.6 m) sia secondo un piano orizzontale (per una estensione di 5 m) con una tagliatrice a catena Fantini, del tutto analoga alle macchine ampiamente diffuse ed utilizzate nel settore delle pietre ornamentali per la produzione di blocchi "a misura" di rocce a media - bassa resistenza.

I fori di sparo, lunghi solo 1 m e quindi meno profondi dei tagli, sono stati caricati con slurry.

Le figure 3 e 4 mostrano gli schemi di sparo utilizzati rispettivamente per la misura della sismicità "diretta" (fori di figura 3, in assenza di pretaglio e senza l'influenza del foro pilota), quelle utilizzate per la verifica dell'influenza dei giunti artificiali (fori di sinistra nella fig. 4) ed, infine, per la valutazione della presenza del foro pilota (fori di destra della stessa figura).

In particolare, nella figura 3 è indicata la distanza dei fori da mina dalla parete del foro pilota ed i quantitativi adottati per ciascun foro, espressi in chilogrammi. Il numero d'ordine con cui sono stati fatti detonare è indicato nella figura 4 (fori a sinistra del tunnel pilota), essendo stati adottati schemi di tiro del tutto identici per poter confrontare sismi ottenuti in condizioni analoghe. Infatti, nella figura 4 sono uguali anche le posizioni geometriche dei fori (a sinistra del tunnel pilota) e le quantità d'esplosivo fatte detonare. Per le stesse ragioni, lo schema di tiro a destra del tunnel pilota è identico (quan-

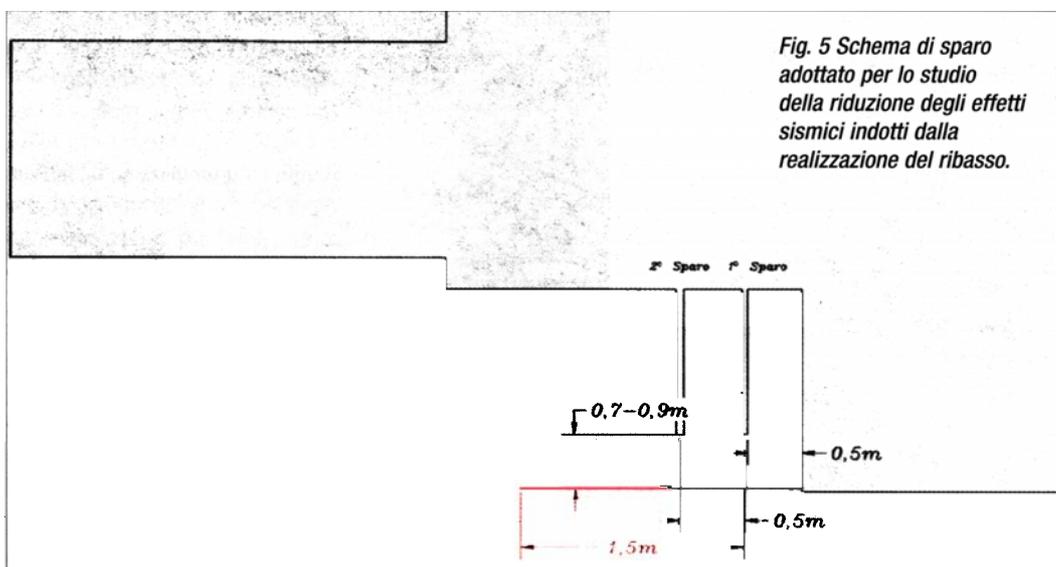


Fig. 5 Schema di sparo adottato per lo studio della riduzione degli effetti sismici indotti dalla realizzazione del ribasso.

tà d'esplosivo, distanze, e n° d'ordine dello sparo) a quello degli altri due programmi di tiro già descritti. Pertanto nella figura 4 ci si è limitati, per chiarezza di lettura, ad indicare solamente l'ordine di brillamento delle mine.

Con riferimento alle mine sul lato sinistro del tunnel pilota, con il colore rosso sono state rappresentate le mine la cui sismicità è stata attenuata dalle discontinuità artificiali; gli spari in colore nero, viceversa, hanno generato sismi che, nonostante il pretaglio, sono risultati sorprendentemente amplificati.

Infine la figura 5 rappresenta lo schema di sparo adottato per lo studio della riduzione degli effetti dei sismi indotti dalla realizzazione del ribasso, nel caso che si realizzi un giunto artificiale (pretaglio alla base). Questo è stato realizzato con giacitura orizzontale alla base della galleria. I fori erano verticali, ad una distanza di 1.5 m gli uni dagli altri e lunghi 1.5 m; quindi tutti i fori terminavano ad una distanza di 1.5 m dal taglio. Un identico schema di tiro è stato adottato per gli esperimenti relativi alla sismicità in assenza della discontinuità artificiale.

4. DESCRIZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI

4.1. Allargamento della sezione

I diagrammi bilogaritmici delle figure 6 e 7 mostrano che i valori del



vettore velocità in funzione della distanza, scalata con la radice quadrata della carica, sono condizionati oltre che dal pretaglio anche dalla presenza del tunnel pilota, che determina una sensibile riduzione della sismicità indotta dai fori di destra rappresentati nella figura 4. In altri termini, nella disposizione geometrica indicata nella sezione verticale della figura 1, il foro pilota, essendo interposto tra la sorgente dei sismi (fori da mina a destra del tunnel pilota) e la galleria da tutelare, funziona come una discontinuità artificiale nei confronti della propagazione delle onde sismiche in direzione della galleria da salvaguardare.

Nelle due figure sono state tracciate le relazioni, ottenute mediante analisi statistica di regressione, che legano le velocità di vibrazione (esprese in cm/s), rilevate dai geofoni, alle distanze (esprese in m/kg^{0.5}) intercorrenti tra sorgenti e geofoni.

Per ciascuna delle tipologie di sparo sono, qui di seguito, fornite due relazioni: la prima corrisponde ad un livello di confidenza del 50%, con la seconda, si accetta la probabilità che il 95% delle velocità misurate siano inferiori ai valori previsti statisticamente.

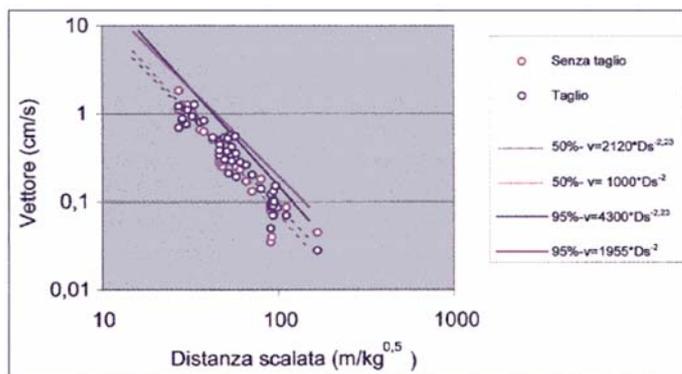


Fig. 6 Spari in calotta: valori del vettore velocità delle particelle in presenza ed in assenza di giunto artificiale.

Nel caso di detonazioni in calotta a sinistra del foro pilota ed in presenza di pretaglio i coefficienti e gli esponenti assumono i seguenti valori statistici (Fig. 6):

$$v = 2120 \cdot D_s^{-2,23}$$

$$v = 4300 \cdot D_s^{-2,23}$$

Per le detonazioni in calotta a sinistra del foro pilota ed in assenza di pretaglio valgono le seguenti relazioni (Fig. 6):

$$v = 1000 \cdot D_s^{-2,0}$$

$$v = 1955 \cdot D_s^{-2,0}$$

Per le mine che sono state fatte detonare in calotta, a destra del foro pilota, e quindi con interposizione del foro pilota tra i fori da mina e la galleria da tutelare, in assenza di pretaglio, l'analisi statistica di correlazione ha fornito le seguenti espressioni, la prima delle quali è stata riportata anche in Fig. 7:

$$v = 1667 \cdot D_s^{-2,27}$$

$$v = 5640 \cdot D_s^{-2,27}$$

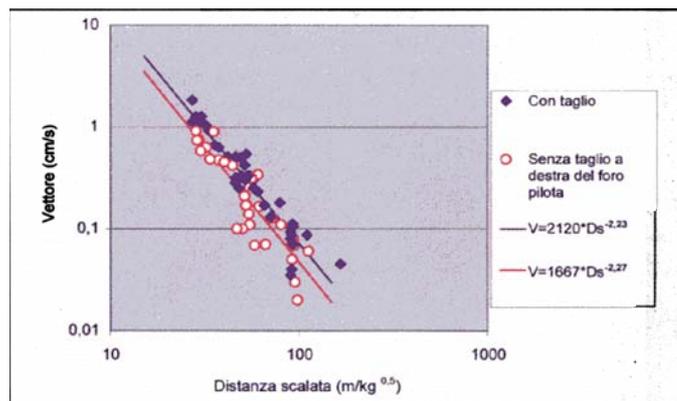


Fig. 7 Spari in calotta: influenza del preforo, in rosso, sui valori del vettore velocità delle particelle

D_s rappresenta la "distanza scalata", cioè il rapporto tra la distanza espressa in metri (tra foro da mina che detona e geofono) e la radice quadrata del quantitativo di esplosivo (espresso in chilogrammi) che detona nello stesso istante.

Dal confronto tra le relazioni 1 e 2, da una parte, e tra le relazioni 3 e 4, dall'altra e, soprattutto, dalla semplice osservazione della figura 6, non emerge in modo netto l'entità dell'influenza del pretaglio sulle dimensioni e le caratteristiche fisiche del fenomeno sismico indotto. Infatti, le rette di regressione per la probabilità 50% e per la probabilità 95% sono quasi coincidenti e si intersecano in accordo con la constatazione che i due insiemi di punti sono indifferenziati.

Il ruolo del foro pilota nei confronti dei sismi indotti diventa evidente con le analisi statistiche. Infatti, la figura 7 che confronta le relazioni 1 e 5 ottenute nelle due configurazioni di prova mostra che le mine a destra del foro pilota (relazione 5) hanno determinato una sismicità meno elevata di quella indotta dai fori a sinistra del foro pilota (con e senza la presenza del taglio).

L'influenza del pretaglio, sulla sismicità indotta, è messa in luce dai diagrammi delle figure 8 e 9, nei quali l'asse delle ascisse è la distanza dei fori da mina dallo spigolo determinato dall'incrocio tra taglio verticale ed orizzontale e le ordinate rappresentano il rapporto tra la velocità in presenza di taglio e la velocità del fenomeno vibratorio in assenza di taglio.

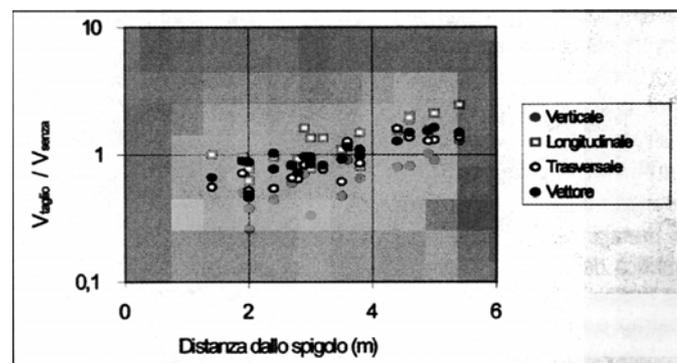


Fig.8 Scavo della calotta: l'efficacia dei giunti artificiali è messa in evidenza dai valori delle componenti e del vettore della velocità delle particelle.

Più precisamente, il diagramma di figura 8 mostra le componenti verticale, longitudinale e trasversale della velocità ed il vettore risultante, mentre nella figura 9 sono riportati solo i valori del vettore della velocità sismica ed è stata tracciata la relazione statistica che lega la

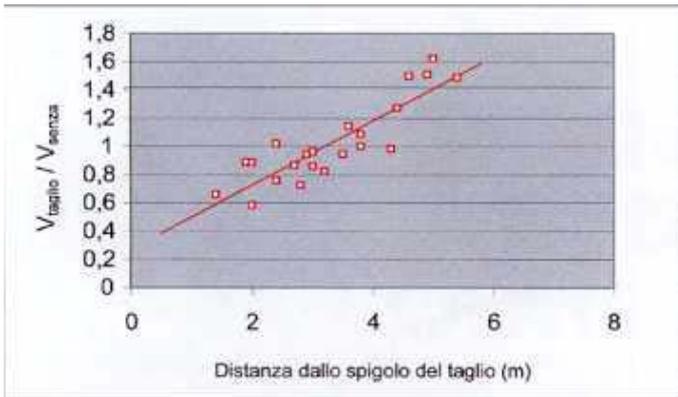


Fig. 9 Influenza del pretaglio sulla sismicità indotta. Valori del vettore della velocità delle particelle

variabile dipendente alla variabile indipendente.

Con riferimento alle componenti del vettore (Fig. 8), si osserva che i pretagli (orizzontale e verticale) per alcuni spari si sono dimostrati efficaci riducendo la sismicità mentre ha ampliato le vibrazioni generate da altri (valori delle ordinate superiori ad uno). In particolare, i giunti artificiali sono meno efficaci nei confronti della componente longitudinale che non nei confronti della trasversale ed ancor più della verticale.

Infatti, poiché l'efficacia del pretaglio è indicata dai valori delle ordinate (rapporto tra le velocità nelle due diverse condizioni sperimentali), nel caso della componente verticale essi sono pressoché sempre inferiore all'unità.

Nel diagramma di figura 8 ed in quello di figura 9, contrariamente a quanto era da attendersi, si osserva, sia per quanto riguarda le componenti sia per quanto riguarda il vettore, che una buona parte dei rapporti delle velocità è sorprendentemente superiore all'unità.

Un'analisi più puntuale mette in evidenza che tutti i fori, rappresentati in rosso a sinistra del foro pilota nella figura 4, che hanno distanza dal taglio verticale inferiore a 5 m (lunghezza del taglio orizzontale) e dal taglio orizzontale inferiore a 2.6 m (lunghezza taglio verticale), in altri termini tutti i fori "inscritti nel pretaglio, hanno manifestato una sismicità inferiore o uguale a quella registrata in assenza delle due discontinuità artificiali, mentre tutti gli altri hanno generato sismi con velocità di vibrazione superiore.

L'analisi statistica tra rapporto della velocità di vibrazione in presenza dei tagli (V_{taglio}) e senza tagli (V), e le distanze di ciascun foro da mina dal taglio orizzontale (y) e dal taglio verticale (x) fornisce il seguente legame di correlazione:

$$V_{\text{taglio}} = 0.13 \cdot y + 0.21 \cdot x + 0.25$$

La relazione rende evidente che il coefficiente del parametro x è il 62% più elevato di quello del parametro y , ciò sta ad indicare che è molto più influente, in queste prove, il taglio verticale rispetto al taglio orizzontale.

4.2. Sismicità indotta dallo scavo per il ribasso

La disposizione geometrica dei fori da mina e del pretaglio (fig. 10) per l'esame delle caratteristiche dei sismi indotti in fase di ribasso ha determinato livelli di velocità sismica che, trattati con analisi statistica regressione, mettono in vista che il seguente legame di correlazione

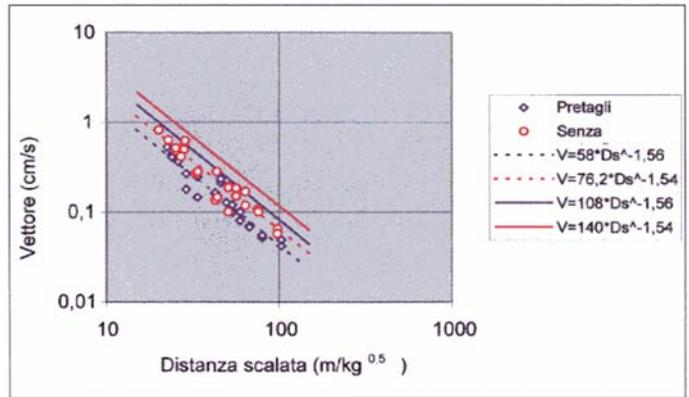


Fig. 10 Sismicità indotta dalle mine di ribasso. Sono fornite le relazioni statistiche relative al 50% e al 95% di affidabilità sia in presenza che in assenza di pretaglio.

nel caso in cui si adotti il pretaglio (relazione 8) e nel caso di continuità del massiccio roccioso (relazione 9):

$$v = 58.0 \cdot D_s^{-1.56}$$

$$v = 76.2 \cdot D_s^{-1.54}$$

Tali relazioni valgono per un livello di confidenza del 50%; le stesse relazioni e quelle valide per un livello del 95% sono riportate in forma analitica e grafica nella figura 10.

Appare del tutto evidente che i sismi indotti da questo tipo di sparo, in presenza o meno di un giunto artificiale (in altre parole: in condizioni di continuità o meno del massiccio roccioso) sono meno intensi di quelli generati dagli spari in calotta. Inoltre, i parametri caratteristici del sisma hanno valori che sono senza alcun dubbio influenzati dalla presenza del taglio ed è anche diversa la relazione che regola la propagazione delle onde. Sembra del tutto evidente che gli effetti del giunto artificiale su questo tipo di geometria di sparo siano da attribuire al valore costante della distanza dell'esplosivo dalla discontinuità.

4.3 Aumento della pressione dell'aria nella galleria in costruzione

Insieme con le misure di velocità sismica nella galleria da protegge-

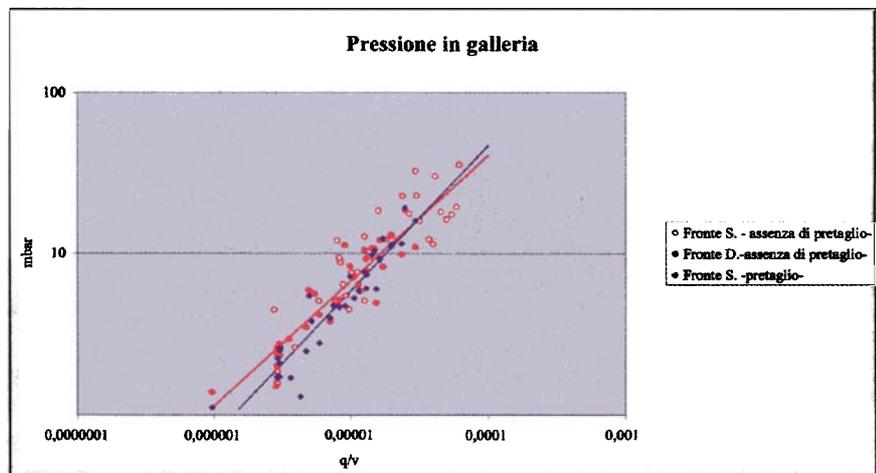


Fig. 11 Pressioni in aria registrate alla detonazione delle mine a sinistra del foro pilota, con e senza giunto artificiale (a sinistra del foro pilota) ed alla detonazione delle mine a destra del preforo in assenza di giunto artificiale.

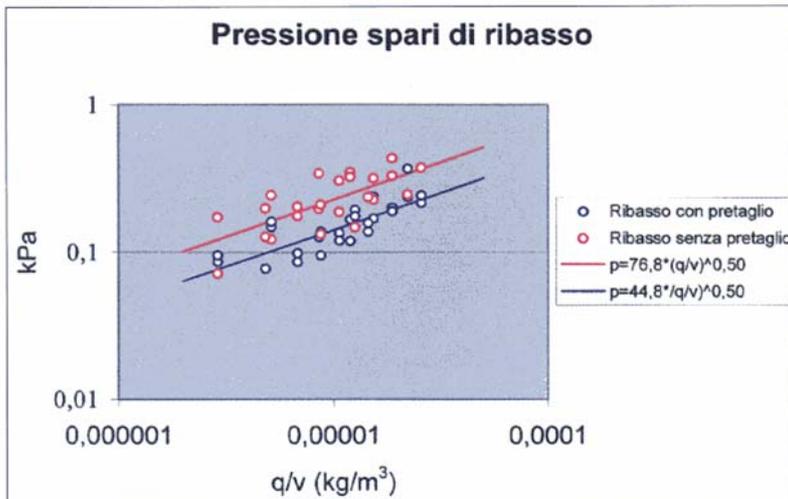


Fig.12 Pressione dell'aria in galleria conseguente lo sparo delle mine di ribasso.

re, sono state effettuate misure di innalzamento della pressione della aria, causato dalla detonazione delle cariche, nella galleria in costruzione. Anche questo aspetto della ricerca è parte di un programma in corso da alcuni anni e che ha già fornito alcuni risultati di rilievo [7]. Le tipologie di prova sottoposte a confronto sono le stesse già descritte in precedenza, vale a dire:

- detonazione delle mine a sinistra del foro pilota, con e senza pretaglio;
- detonazione delle mine a destra del preforo;
- detonazione delle mine di ribasso.

Con le prime due tipologie di sparo si sono ottenuti i risultati rappresentati nella figura 11, nella quale sono riportati i valori e le leggi statistiche di correlazione tra la pressione dell'aria (ordinate) ed il rapporto tra il quantitativo di esplosivo innescato contemporaneamente ed il volume della galleria. Le leggi di correlazione sono relative ai valori di pressione registrati in presenza ed in assenza del pretaglio, in quest'ultimo caso, senza distinzione tra i fori a destra e a sinistra del foro pilota.

L'analisi statistica ha messo in evidenza che i valori seguono due leggi distinte ed in particolare che la presenza del pretaglio è efficace per la riduzione dei valori di sovrappressione in aria quando lo è anche per i sismi. In pratica, il pretaglio influenza i processi di fratturazione (migliorandoli) e quindi modifica sostanzialmente anche l'energia residua immessa in aria ed il conseguente innalzamento di pressione.

Le registrazioni realizzate nel corso delle prove relative al ribasso hanno messo in evidenza, in analogia con quanto è emerso dalle misure di vibrazione, una più netta separazione tra le nuvole di punti ottenute rispettivamente in presenza ed in assenza del pretaglio (Fig. 12). In altre parole, le misure hanno confermato che quando la distanza carica - discontinuità artificiale è tale da influenzare le vibrazioni, corrispondentemente si ha un'attenuazione molto significativa della pressione, poiché il giunto, riflettendo le onde sismiche, ottimizza i processi di fratturazione e libera in aria una minore quantità di energia residua

5. CONCLUSIONI

I risultati di questa parte del programma di ricerca sono in accordo con quelli già ottenuti in precedenza [6], [7]. Si può quindi conclude-

re che sia i valori di sismicità sia i valori di pressione dipendono non solo dai parametri di caricamento e della distanza dalla sorgente (cariche in foro), ma anche dalla presenza o meno di tagli artificiali.

Per quanto riguarda l'innalzamento di pressione dell'aria nella galleria in corso di scavo, si osserva che la pressione risulta drasticamente ridotta a causa, probabilmente, della maggiore quota dell'energia d'esplosione consumata nei processi di fratturazione favoriti dalla presenza di giunti realizzati prima degli spari.

¹ Prof. Ing., Ordinario di Arte Mineraria, Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna

² Prof. Ing., Associato di Ingegneria degli Scavi, Facoltà di Ingegneria, Università di Roma "La Sapienza"

³ Prof. Ing., Presidente Società Italiana Gallerie - Milano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] BERRY P., DANTINI E.M. - *Fratturazione indotta dalle mine sul massiccio - Giornate d'informazione sugli esplosivi nelle applicazioni dell'ingegneria civile - IS. FF. SS., Roma, 1986*
- [2] BERRY P., DANTINI E.M. - *Blasting Techniques Used in the 1950's and their Probable Effects on Mechanical Characteristics of Rock Vis - à Vis Current Methods - Proc. Int. Conf. On Rock Eng. And Excav. In an Urban Environment - IMM, pp. 517 ÷ 521, Hong Kong, 1986*
- [3] BERRY P., DANTINI E.M. - *Criteri di stima e di controllo della sismicità indotta da scavi con esplosivo - Atti Congr. Int. Su grandi Opere Sotterranee, ITA - AITES - SIG, Vol. II, pp. 500 ÷ 505, Firenze, Italy, 1986*
- [4] BERRY P., DANTINI E.M. - *Role of Blasting Control in Excavation Works near a Preexisting Tunnel - Proc. Int. Conf. On Rock Eng. And Excav. In an Urban Environment - IMM, pp. 15 ÷ 25, Hong Kong, 1986*
- [5] BERRY P., BRUNO R., DANTINI E.M. - *Analisi probabilistica sperimentale dei tempi di detonazione di volate in galleria - Atti Conv. Naz. Su Problemi tecnico - economici connessi con lo scavo di gallerie - pp. 11 ÷ 16, ANIM, Verona, Italy, 1987*
- [6] BERRY P., DANTINI E.M. - *Sismicità indotta da volate in galleria - Atti 2° Congr. Int. Italo - Brasiliano, ANIM, pp. 283 ÷ 295, Sao Paulo, Brasil, 1993*
- [7] BERRY P., DANTINI E.M. - *Stima delle sovrappressioni in aria generate da volate in galleria - Quarry and Construction, XXXII, n. 12, pp. 79 ÷ 87, 1994*