

Le sollecitazioni indotte nell'ammasso roccioso dall'esplosivo

Analisi e controlli durante lo scavo della galleria «Scindo Passo» a Favignana (TP)

Stresses induced in the rock mass by blasting

Analysis and monitoring during excavation of «Scindo Passo» tunnel in Favignana - Sicily

Roberto Folchi*
Salvatore Simonetti**

SOMMARIO

Nella presente nota sono descritte le problematiche affrontate durante i lavori di scavo della galleria stradale «Scindo Passo», nell'isola di Favignana (Trapani).

La galleria è stata realizzata in un ammasso con scarpate in condizioni di precario equilibrio statico. Frequentemente, dalla scarpata, si distaccano porzioni massive di roccia.

Lo scavo è stato effettuato con il metodo tradizionale (perforazione e sparo mine). Le volate d'abbattimento sono state progettate in modo da contenere le sollecitazioni indotte nell'ammasso, entro valori tali da non alterare significativamente le preesistenti condizioni di equilibrio statico delle scarpate.

Il rispetto delle rigorose condizioni di sicurezza, assunte in fase di progetto, è stato garantito mediante il controllo strumentale delle vibrazioni indotte dall'esplosivo. I risultati sono esposti e commentati.

SYNOPSIS

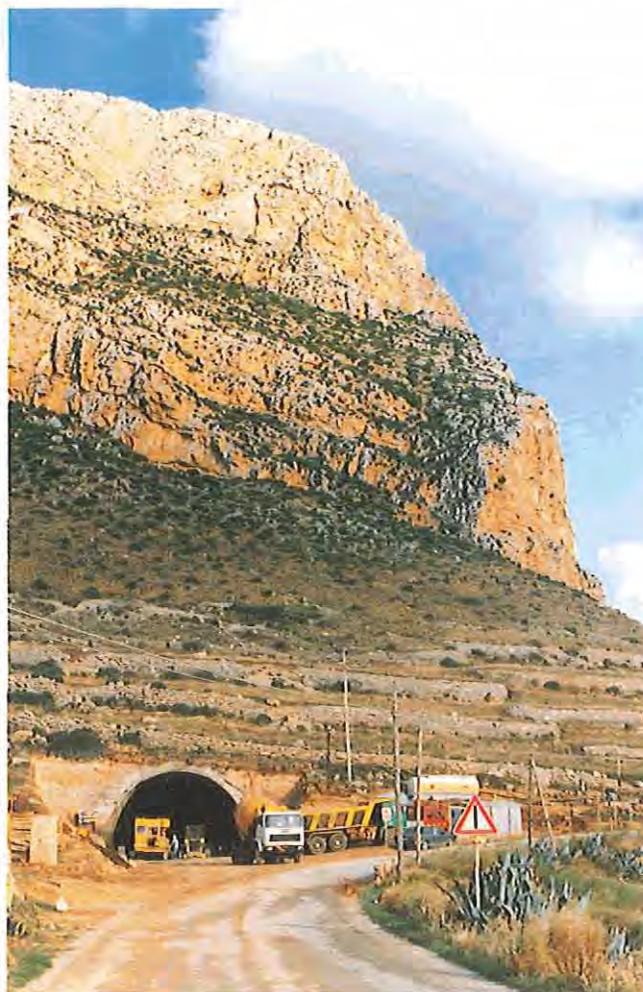
The problems dealt with excavation of a road tunnel called «Scindo Passo», in the Favignana island (Trapani, Italy), are described in this article. The tunnel was excavated close to a slope in unstable condition. From this slope are frequently sliding massive rock volumes.

Excavation was performed with drilling and blasting method. Blast rounds were projectet in order to keep stress induced in the rock mass, below those values which would have modified, appreciably, slope preexistent static stability.

To verify that the safety rules imposed in the controlled blasting project were really adopted on field, blast induced vibrations were continuously monitored. Results are exposed and analized.

1. GENERALITÀ

★ La galleria è stata realizzata in variante al tratto «Scindo Passo» della strada provinciale che collega l'abitato di Favignana alla località Punta Sottile, nella costa occidentale dell'isola. La variante si è resa necessaria in quanto, dalla scarpata al lato della strada si verificano frequenti distacchi di massi. Ciò costituisce un grave pericolo per i veicoli ed i pedoni che, soprattutto d'estate, vi transitano in gran numero. Lo scavo si sviluppa per 676 m nell'ammasso del Monte S. Caterina, sulla costa meridionale dell'isola (figg. 1 e 2) con pendenza pari allo 0,817%, ad immergere da Ovest verso Est.



1. INTRODUCTION

★ Tunnel was realized to bypass the Scindo Passo section of the provincial road which links Favignana city to Punta Sottile spot, on the Western coast of the island. Such a by-pass became necessary because of the frequent rock sliding from S. Caterina mountain slopes facing the road. This is constituting a serious danger for vehicles and people that, expecially in summer, pass through in large number.

The tunnel has been excavated for 676 m in the rock mass of the S. Caterina mountain, on the Southern coast of the island (fig.s 1 and 2) with a dip of 0.817% from West to East.

* Dott. ing. Roberto Folchi - STF Ingegneria degli esplosivi - Roma.

** Dott. ing. Salvatore Simonetti - Direttore tecnico della TUNNEDIL SCRL - Agrigento.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La morfologia del sito è caratterizzata da versanti aspri che degradano rapidamente verso il mare. Oltre la quota 60 m (s.l.m.) sul versante Est, ed oltre la quota 100 m sui versanti Sud ed Ovest, le pareti dell'ammasso roccioso sono subverticali.

La galleria è stata realizzata in un ammasso calcareo stratificato in banchi potenti sino a 2 m. Le caratteristiche geomecniche possono essere definite come «discrete-buone» ($Q = 3 \div 9,6$ nella classifica di Barton, $RMR = 51 \div 65$ nella classifica di Bieniawski). Durante lo scavo sono stati intercettati intercalari di marna sovraconsolidata con potenza sino ad 1,5 m e zone interessate da un'intensa azione carsica.

Da rilievi effettuati l'ammasso è risultato interessato da tre famiglie di giunti che isolano porzioni di roccia di forma pseudo parallelepipedica (fig. 3).

Le superfici di giunto sono piane e scabre. In affioramento i giunti sono aperti (da 1 a 5 mm) ed allentati, spesso riempiti da limo e terriccio, nell'ammasso sono generalmente ben serrati e localmente ricementati da calcite.

Sul versante Est è stata incontrata una calcarenite debolmente cementata, localmente ben cementata da calcite. Nella calcarenite sono stati intercettati grossi trovanti di roccia calcarea. Sul versante Ovest è stata incontrata una formazione di detrito di falda costituito da ghiaia e blocchi calcarei immersi in una matrice sabbioso-limosa. Sottostante il detrito di falda una breccia a clasti calcarei di forma irregolare a locale matrice sabbiosa cementata da calcite.

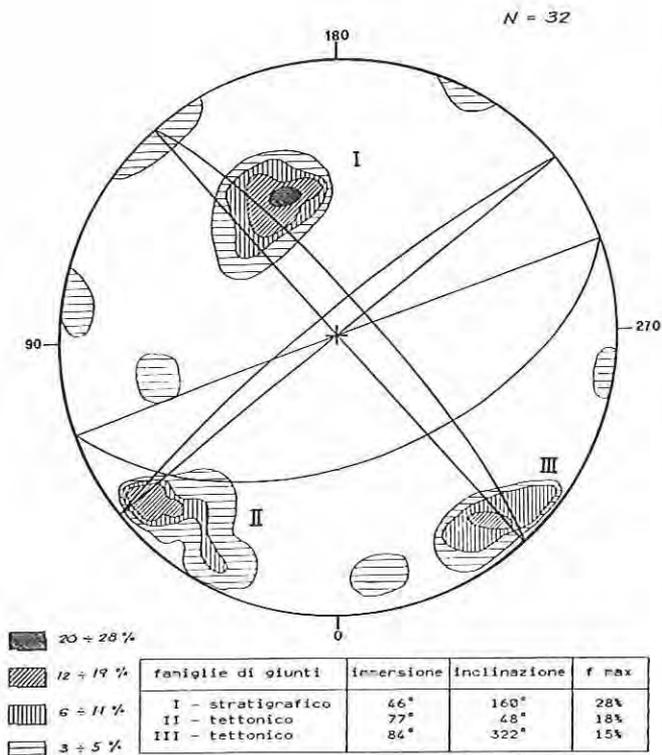


Fig. 3
Curve di isodensità dei giunti rilevati nell'ammasso e meridiani rappresentativi delle famiglie principali.
Isodensity curves of joints, as surveyed in the limestone rock mass, and representative meridians of the main joint families.

2. GEOLOGY

Morphology of the site is characterized by sharp slopes quickly dipping downward. Over contour of 60 m (on a.s.l.) at East and over 100 m at Sud and East sides, slopes are sub-vertical (photo 1).

Excavation was carried out in a layered limestone formation with stratas up to 2 m thick (photo 2). Geomechanical characteristics may be considered as «average-good» ($Q = 3 \div 9.6$ in the Barton classification, $RMR = 51 \div 65$ in the Bieniawski classification). Overconsolidated marl levels up to 1.5 m thick (photo 3) and large volumes of rock with carsic cavities were also met.

From field survey it was possible to distinguish 3 main joint families: strata and tectonic joints define pseudo-parallelepiped rock blocks (fig. 3).

Joints are plane and rough. Outcropping joints are opened (up to 5 mm) and loosed, frequently filled with silt and top soil; inside the rock mass they are generally well closed and locally cementated by calcite.

In excavating the East adit a lightly cementated calcarenite formation (locally well cementated by calcite) was met. In the calcarenite large erratic limestone boulders were met.

In excavating the West adit a scree formation, composed by gravel and carbonatic blocks with sandy-silty matrix, was met. Under the scree a breccia made of irregularly shaped limestone clasts, with a local sandy matrix generally cementated with calcite, was met.

3. ANALYSIS AND PROJECT FOR CONTROLLED BLASTING

3.1. Preliminary remarks

The presence of the slope in unstable condition has obliged to do put particular care in defining safety rules in the blast rounds projects. As a matter of fact it was necessary to keep stresses induced in the rock mass by the blast, below those values which would have affected the slopes preexisting condition of static stability.

Field survey, geomechanical prospection and analysis of the mechanical and structural characteristics of the mass has showed that the most probable rupture mechanism consisted in the sliding of blocks (about 2 m large and 1,5 m thick) along the strata joint (whose dip is 46° to horizon).

In performing static stability analysis, adopting a conservative hypothesis, were omitted the forces mobilized along adjoining planes of the blocks.

The resulting model consists, therefore, in a pseudo parallelepiped block laying on the strata joint (fig. 4).

3.2. Static stability

Acting forces are the following (fig. 4a):

W (block weight) = $\rho \cdot g \cdot V = \rho \cdot g \cdot A \cdot h$;

T (component of W parallel to strata joint) = $W \cdot \sin\theta$;

N (component of W orthogonal to strata joint) = $W \cdot \cos\theta$;

TR (resisting force developed because of the friction on the strata joint) = $N \cdot \text{tg}\alpha$.

Safety factor «FS» can be, therefore, assumed to be equal to:

$$FS = \frac{\text{resisting forces}}{\text{acting forces}} = \frac{TR}{T} = \frac{N \cdot \text{tg}\alpha}{W \cdot \sin\theta} = \frac{W \cdot \cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{W \cdot \sin\theta} = \frac{\text{tg}\alpha}{\text{tg}\theta}$$

3. ANALISI E PROGETTO DELL'ABBATTIMENTO CONTROLLATO

3.1. Introduzione

La presenza di scarpate in condizioni di equilibrio prossimo a quello limite, ha obbligato ad un approccio mirato nella progettazione delle volate d'avanzamento. In particolare è stato necessario contenere le sollecitazioni, associate al transiente sismico indotto nell'ammasso roccioso dall'esplosivo, entro valori tali da non alterare, in modo significativo le preesistenti condizioni di equilibrio statico delle scarpate.

Lo studio per la caratterizzazione geomeccanica e strutturale dell'ammasso ha messo in evidenza che i meccanismi di rottura possibili erano relativi allo scivolamento di blocchi (con base pari a circa 2 m ed altezza pari a circa 1,5 m) lungo il giunto stratigrafico (inclinato di circa 46° rispetto all'orizzontale).

Nel condurre la verifica di stabilità statica e dinamica sono state trascurate, a favore della sicurezza, le forze mobilitate lungo i piani di contatto tra blocchi adiacenti.

Il modello risultante consiste, quindi, in un blocco di forma pseudo parallelepipedica appoggiato sul piano di strato (fig. 4).

3.2. Stabilità statica

Le forze agenti sono (fig. 4a):

W (peso del blocco) = $\rho \cdot g \cdot V = \rho \cdot g \cdot A \cdot h$;

T (componente di W in direzione parallela al giunto) = $W \cdot \sin\theta$;

N (componente di W in direzione ortogonale al giunto) = $W \cdot \cos\theta$;

TR (forza resistente sviluppata per attrito sul giunto) = $N \cdot \tan\alpha$.

Il fattore di sicurezza «FS» sarà pertanto pari a:

$$FS = \frac{\text{forza resistente}}{\text{forza agente}} = \frac{TR}{T} = \frac{N \cdot \tan\alpha}{W \cdot \sin\theta} = \frac{W \cdot \cos\theta \cdot \tan\alpha}{W \cdot \sin\theta} = \frac{\tan\alpha}{\tan\theta}$$

3.3 Stabilità dinamica

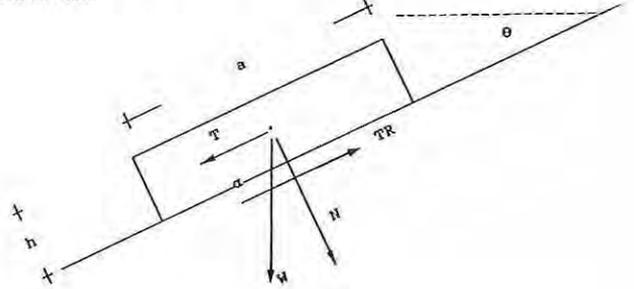
Alle forze agenti in condizioni statiche vanno a sommarsi quelle associate al transiente sismico indotto dall'esplosivo. La forza dinamica agente «TD» è pari a: « $A \cdot \tau \cdot p$ » (dove « A » è l'area di base del blocco, « τ » è la sollecitazione di taglio associata al passaggio del transiente sismico, « p » è un coefficiente di riduzione funzione della frequenza del moto, della lunghezza d'onda del transiente sismico, della geometria e delle dimensioni del blocco).

La sollecitazione « τ » associata al transiente sismico può essere posta pari a: « $\rho \cdot C_s \cdot v$ » (dove « ρ » è la densità del mezzo di propagazione, « C_s » è la velocità di propagazione delle onde trasversali (o di taglio) e « v » è la velocità delle particelle del mezzo, al passaggio del transiente sismico, in direzione ortogonale alla direzione del moto).

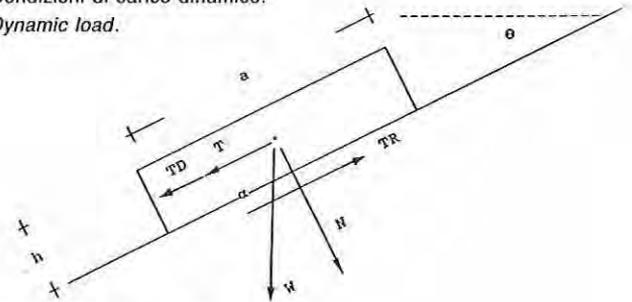
Ipotizzando, a favore della sicurezza, che l'onda sismica incida in direzione perpendicolare al piano di giunto e che la massima velocità delle particelle si rilevi in direzione e verso coincidenti con quello della forza agente « T » (parallela al piano del giunto), ne consegue che la sollecitazione di taglio « τ » sarà pari a: « $\rho \cdot C_s \cdot v_{MAX}$ ».

Ipotizzando inoltre, sempre a favore della sicurezza, che la forza risultante sia applicata al baricentro del blocco, si avrà un fattore di sicurezza dinamico «FSD» pari a:

a) Condizioni di carico statico ($v_{MAX}=0$)
Static load.



b) Condizioni di carico dinamico.
Dynamic load.



- A: Area di base del blocco.
Block base area.
- h: Altezza (spessore) del blocco.
Block height.
- V: Volume del blocco (= h · A).
Block volume.
- g: Accelerazione di gravità.
Gravity acceleration.
- ρ : Densità del materiale.
Medium density.
- θ : Inclinazione piano (giunto) rispetto all'orizzontale.
Joint dip to horizon.
- α : Angolo d'attrito tra blocco e piano (giunto).
Friction angle between joint and block.

Fig. 4
Blocco di calcare appoggiato sul piano di strato e sottoposto a condizioni di carico statico (a) e dinamico (b).
Limestone block, laying on the strata joint, under static (a) and dynamic (b) loads.

3.3 Dynamic stability

Forces associated to the blast induced seismic transient are added to those acting in static condition. The acting dynamic force «TD» can be assumed to be equal to: « $A \cdot \tau \cdot p$ » (where « A » is block base area, « τ » is shear stress associated to seismic transient, « p » is a reduction coefficient depending on frequency of the ground particle motion, on wave length of seismic transient, of shape and dimension of the block).

Stress « τ », associated to the seismic transient, can be assumed equal to: « $\rho \cdot C_s \cdot v$ » (where « ρ » is density of propagation medium, « C_s » is shear wave propagation velocity and « v » is ground particle velocity, induced by seismic transient, in a direction transversal to that of wave propagation).

Considering seismic wave striking orthogonal to the strata joint and considering induced peak particle velocity having the same direction of the acting static force « T » (which is parallel to strata joint), it follows that shear stress value « τ », is the maximum possible and it is equal to: « $\rho \cdot C_s \cdot v_{MAX}$ ».

Still adopting a conservative hypothesis by assuming resulting dynamic forces applied at block barycenter, the resulting safety factor in dynamic condition of load «FSD» is then equal to:

$$FSD = \frac{\text{forza resistente}}{\text{forza agente}} = \frac{TR}{T+TD} = \frac{W \cdot \cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{W \cdot \sin\theta + A \cdot \rho \cdot C_s \cdot v_{MAX} \cdot p} =$$

$$= \frac{\rho \cdot g \cdot A \cdot h \cdot \cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{\rho \cdot g \cdot A \cdot h \cdot \sin\theta + A \cdot \rho \cdot C_s \cdot v_{MAX} \cdot p} =$$

$$= \frac{\cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{\sin\theta + \frac{1}{g \cdot h} \cdot C_s \cdot v_{MAX} \cdot p};$$

da cui si rileva che $v_{MAX} = \left(\frac{\cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{FSD} - \sin\theta \right) \cdot \frac{g \cdot h}{C_s \cdot p}$

Assumendo valori indicativi della frequenza del moto delle particelle di terreno al passaggio dell'onda sismica e calcolati i relativi valori del coefficiente di riduzione «p» è stato possibile stabilire il valore della velocità delle particelle di terreno «v_{MAX}» da non superare per contenere la riduzione del fattore di sicurezza statico «FS» entro un prefissato valore (fig. 5). Dalla misura delle vibrazioni indotte da alcune volate di prova è stato possibile rilevare che le frequenze caratteristiche del transiente sismico erano superiori a 100 Hz. Avendo ritenuto accettabile una riduzione del coefficiente di sicurezza statico intorno al 20%, con riferimento al grafico della riduzione percentuale del fattore di sicurezza della scarpata relativo a frequenze intorno a 100 Hz, è stata adottata una velocità limite di sicurezza «v_{MAX}» pari a 12 mm/s.

$$FSD = \frac{\text{resisting forces}}{\text{acting forces}} = \frac{TR}{T+TD} = \frac{W \cdot \cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{W \cdot \sin\theta + A \cdot \rho \cdot C_s \cdot v_{MAX} \cdot p} =$$

$$= \frac{\rho \cdot g \cdot A \cdot h \cdot \cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{\rho \cdot g \cdot A \cdot h \cdot \sin\theta + A \cdot \rho \cdot C_s \cdot v_{MAX} \cdot p} =$$

$$= \frac{\cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{\sin\theta + \frac{1}{g \cdot h} \cdot C_s \cdot v_{MAX} \cdot p};$$

from which it comes that: $v_{MAX} = \left(\frac{\cos\theta \cdot \text{tg}\alpha}{FSD} - \sin\theta \right) \cdot \frac{g \cdot h}{C_s \cdot p}$

Assuming reference values for the frequency of blast induced ground particle motion, were computed corresponding «p» reduction coefficient values. It was so possible to establish the peak particle velocity «v_{MAX}» to be not exceeded to keep reduction of static safety factor «FS» in a prefixed percentage (fig. 5).

By analysis of waveform induced by trial blasts showed that predominant characteristic frequency of seismic transient was higher than 100 Hz. Considering acceptable a reduction of static safety factor around 20%, referring to the graph of the percentual reduction of the slope static safety factor for frequencies around 100 Hz, it was adopted a value of 12 mm/s as bounatry peak particle velocity «v_{MAX}» (fig. 5).

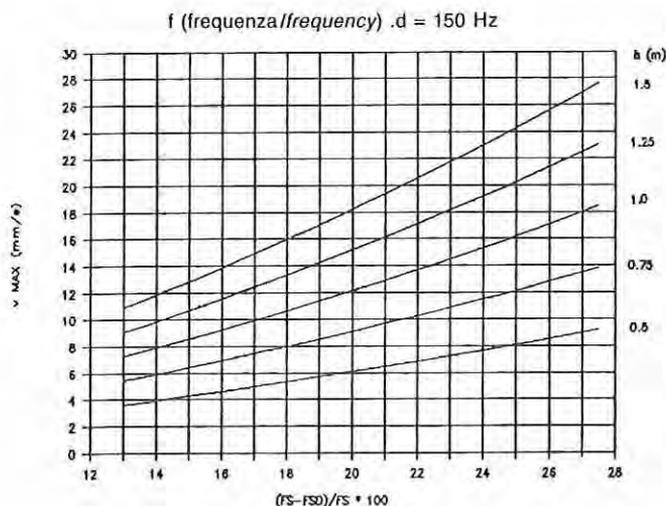
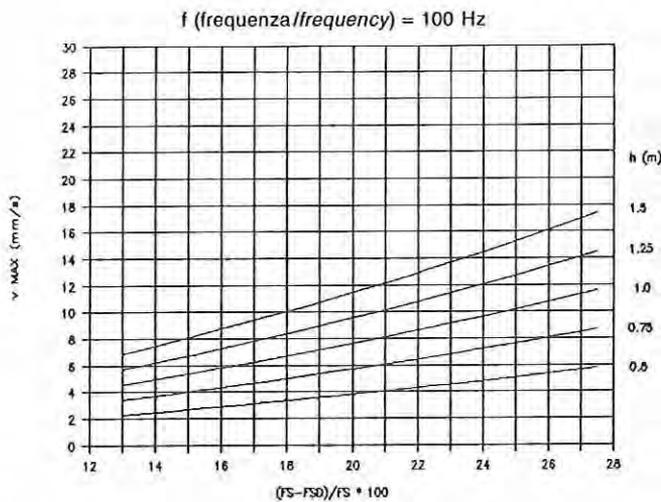


Fig. 5

Riduzione percentuale del fattore di sicurezza statico della scarpata al variare della velocità massima delle particelle di terreno al passaggio del transiente sismico «v_{MAX}» ed al variare dello spessore del blocco di calcare.

Percentual reduction of the slope static safety factor versus peak particle velocity «v_{MAX}» and limestone block thick.

θ	(inclinazione del giunto rispetto all'orizzontale): (joint dip to horizon)	46°;
α	(angolo d'attrito del giunto): (friction angle between joint and block)	55°;
C _s	(velocità delle onde di taglio): (shear waves velocity)	2300 m/s;
h	(altezza del blocco): (block height)	0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5 m;
a	(dimensione di base del blocco) (block base linear dimension)	2 m;
FS	(fattore di sicurezza statico): (static safety factor)	tgα/tgθ;
FSD	(fattore di sicurezza dinamico): (dynamic safety factor)	variabile tra 1 e 1.2;
f	(freq. predom. del transiente sismico): (seismic transien predominant frequency)	100 e 150 Hz

4. PIANO DEI CONTROLLI

Preliminarmente all'avvio dei lavori di scavo sono state indicate, dai funzionari del Distretto Minerario della Regione Sicilia, alcune scarpate in condizioni particolarmente critiche. Tra queste la più vicina era sita a circa 50 m dall'asse della galleria, nei pressi dell'imbocco Est (fig. 6).

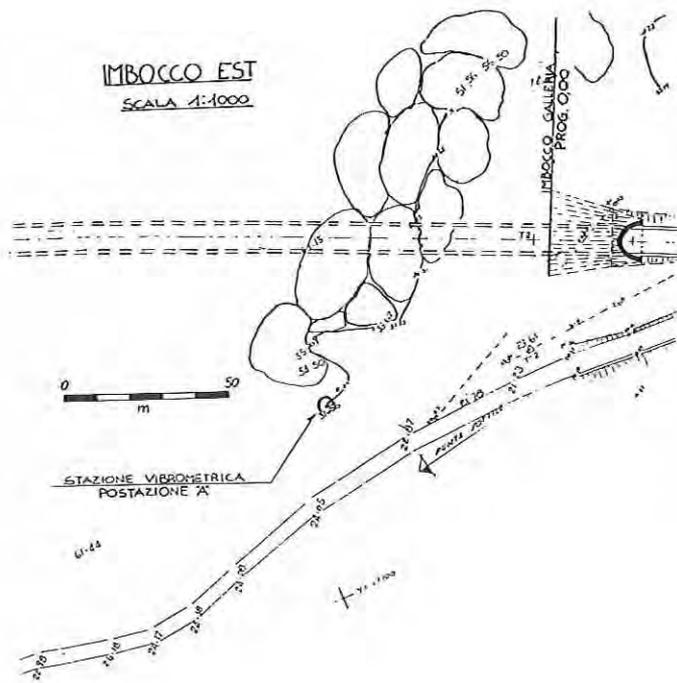


Fig. 6
Ubciazione del punto di misura (Postazione «A»)
Seismic induced vibration: measuring spot («A»).

Per la verifica delle rigorose condizioni di sicurezza attinte in fase di progetto, è stato programmato un controllo strumentale delle onde sismiche indotte dal brillamento delle cariche esplosive in prossimità della scarpata più vicina all'asse della galleria (foto 1 e 2). Oltre ciò sono stati predisposti una serie di capisaldi deformometrici a cavallo di massi contigui, così da permettere la misura (al centesimo di millimetro) degli eventuali movimenti relativi.

Per le volate d'abbattimento del segmento di galleria prossimo alla scarpata (imbocco Est) sono state misurate, con il sismografo digitale VMS 500 della Thomas Instruments Inc. (foto 4), le componenti verticale, orizzontale trasversale ed orizzontale longitudinale della velocità delle particelle di terreno al passaggio del transiente sismico.

I vibrogrammi sono stati immediatamente restituiti su carta con il plotter del sismografo e memorizzati su supporto magnetico per analisi post acquisizione (figg. da 7 a 12).

I vibrogrammi plottati sono stati conservati in cantiere. In tal modo è sempre stato possibile fornire in tempo reale, ai funzionari degli Enti e delle Amministrazioni addetti al controllo dei lavori, una documentazione attestante il rispetto delle prescrizioni del progetto di abbattimento controllato con esplosivi. Il controllo strumentale è stato sospeso quando l'ampiezza delle velocità delle particelle ha raggiunto 1,5 mm/s (la soglia di trigger del sismografo è stata posta su 1,27 mm/s).

4. BLAST INDUCED VIBRATION AND BLOCKS DISPLACEMENT MONITORING

At the very beginning of the work, officials of the Mining Office of the Sicilian Region indicated some areas in particularly critical conditions. The closest between those indicated was about 50 m far from tunnel axis, near East adit (fig. 6).

A monitoring station, for instrumental control of blast induced seismic waves, was set in place at the bottom of the closest «critical» slope (photos 4 and 5). It was so possible to verify that the safety rules imposed in the controlled blasting projects were adopted on field. Also datums points, across adjoining blocks, were fixed for measuring (1/100 mm accuracy) relative movements.

By means of the digital seismograph VMS 500 (by Thomas Instruments Inc.), vertical, horizontal transversal and horizontal radial components of ground particle velocity were measured for all the rounds blasted in the section of tunnel close to the slope (East adit).

Data logs of the measured values and waveforms were immediately printed on paper with seismograph plotter and recorded on floppy disk for further analysis (fig.s from 7 to 12). The records plotted were hold in the yard offices. In such a way it was possible for local and governative officials supervising the work, to have real time evidency of the safety rules respect.

Seismic monitoring was stopped when peak particle velocity reached 1.5 mm/s (trigger level was fixed to 1.27 mm/s).

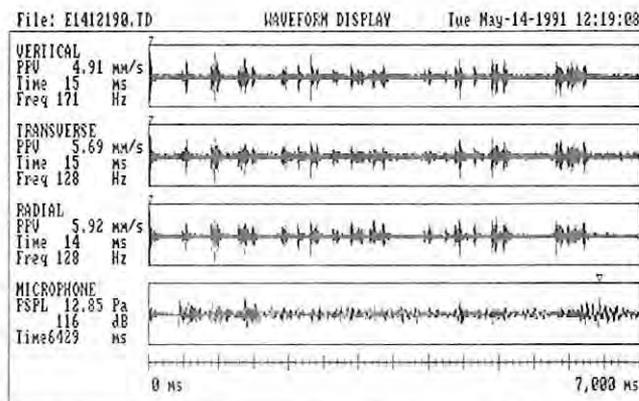


Fig. 7
Forma d'onda.
Waveform recorded.

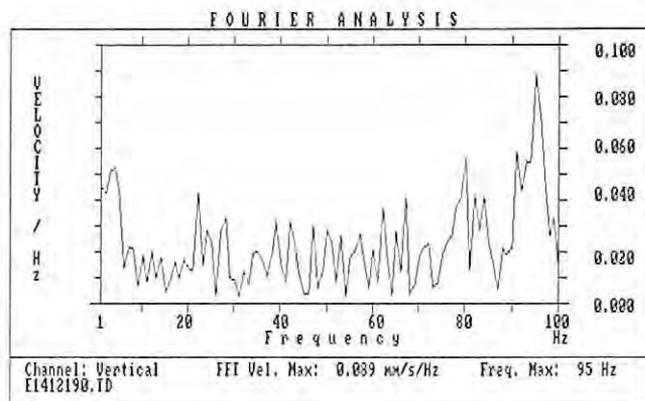


Fig. 8
Analisi di Fourier della componente verticale della velocità delle particelle (forma d'onda in fig. 7).
Fourier analysis of the vertical component of ground particle velocity (waveform in fig. 7).

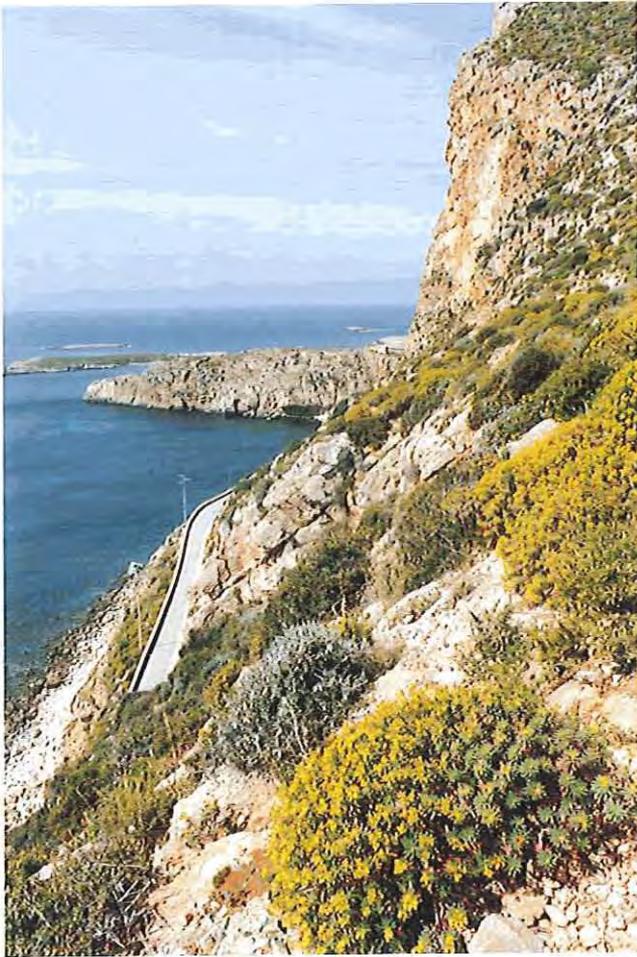


Foto 1
 Versante meridionale del monte S. Caterina con le scarpate rapidamente immergenti verso il mare e sub-verticali oltre quota 60 m.
Southern side of S. Caterina Mountain with slopes quickly dipping downward and sub-vertical over contour of 60 m.

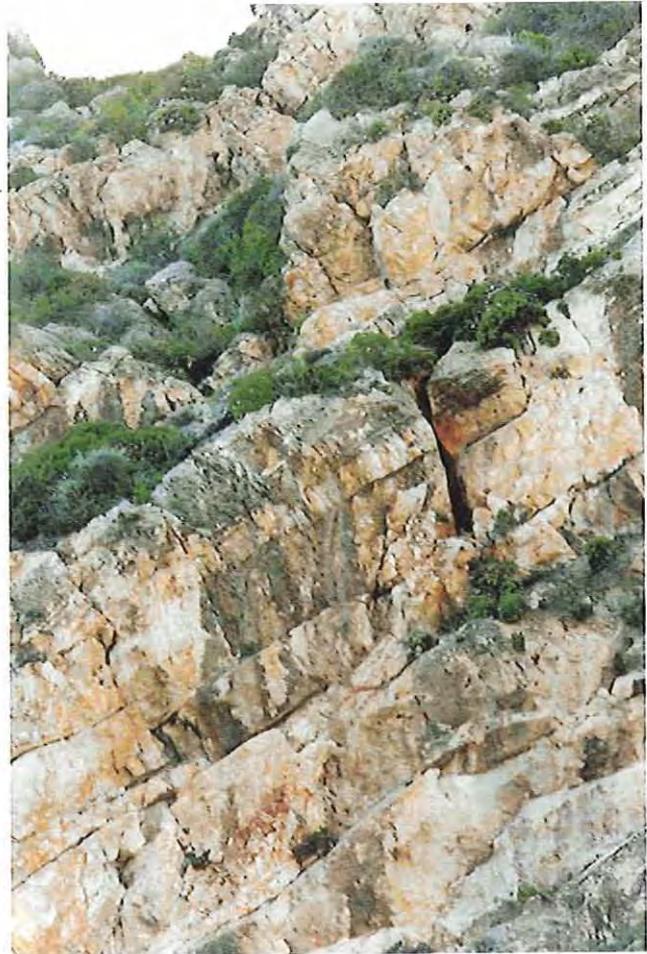


Foto 2
 Formazione calcarea. Giunti affioramento aperti (fino a 5 mm) ed allentati, frequentemente riempiti da limo e terreno vegetale. Localmente cementati da calcite.
Limestone formation. Outcropping joints opened (up to 5 mm) and loosened, frequently filled with silt and top soil. Locally cementated by calcite.



Foto 3
 Livelli di marna sovraconsolidata incontrata durante lo scavo del tunnel.
Overconsolidated marl levels meet in tunnel excavation.



Foto 4
 La postazione di misura delle vibrazioni (Postazione «A») ed il sismografo digitale VMS 500 della Thomas Instruments Inc.
Seismic induced vibration measuring spot («A») and VMS 500 digital seismograph by Thomas Instruments Inc.

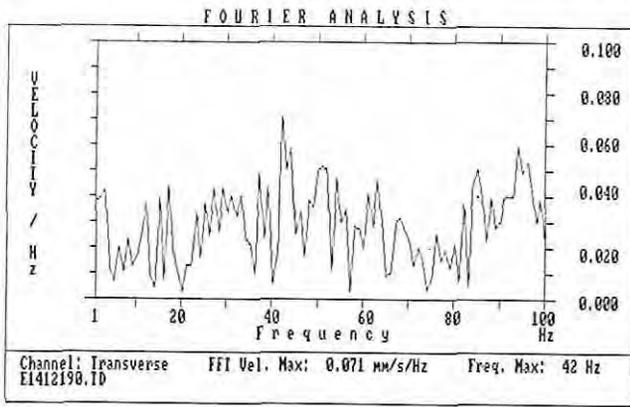


Fig. 9
Analisi di Fourier della componente orizzontale trasversale della velocità delle particelle (forma d'onda in fig. 7).
Fourier analysis of the horizontal transversal component of ground particle velocity (waveform in fig. 7).

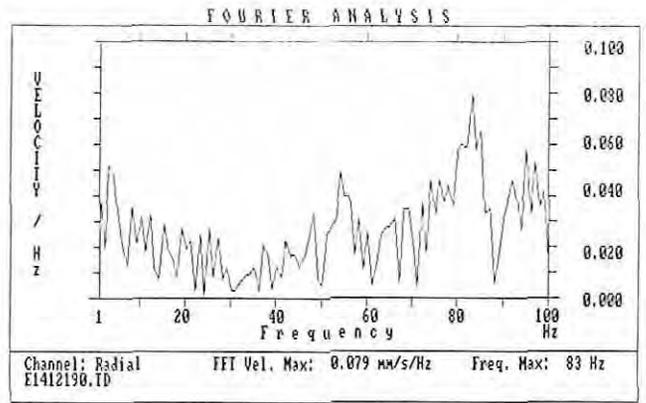


Fig. 10
Analisi di Fourier della componente orizzontale radiale della velocità delle particelle (forma d'onda in fig. 7).
Fourier analysis of the horizontal radial component of ground particle velocity (waveform in fig. 7).

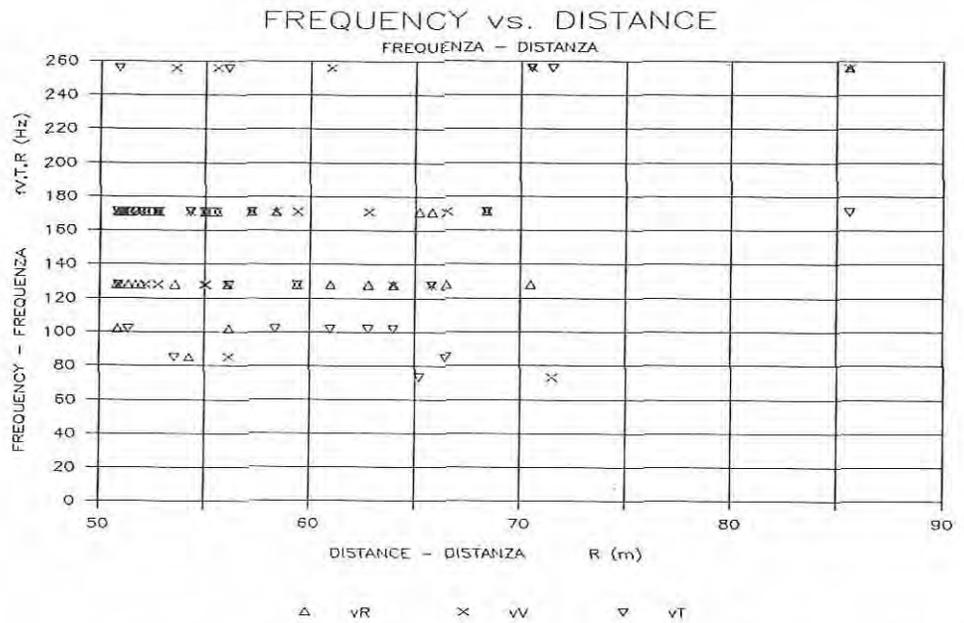


Fig. 11
Frequenza del valore di picco delle componenti verticale, orizzontale trasversale ed orizzontale longitudinale, misurate per varie distanze dal punto di sparo.
Predominant frequency of the peak values of the vertical, horizontal transversal and horizontal radial components of the particle velocity, measured at various distances from the shot.

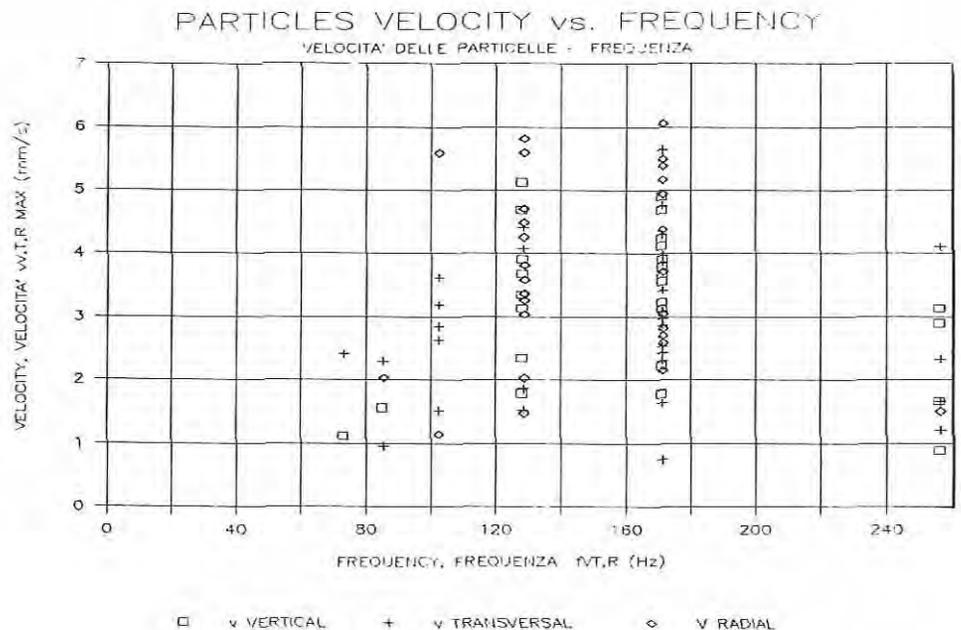


Fig. 12
Valori di picco delle componenti verticale, orizzontale trasversale ed orizzontale longitudinale della velocità delle particelle, e loro frequenze.
Peak values of vertical, horizontal transversal and horizontal radial components of the ground particle velocity and their predominant frequencies.

5. RISULTATI DEL CONTROLLO STRUMENTALE

Dei dati misurati è stata effettuata la regressione di potenza con « v_{MAX} » variabile dipendente, « R » (percorso sismico ovvero distanza tra il punto di sparo ed il punto di misura) e « Q_{MAX} » (peso della carica di esplosivo, lo slurry SIGMA 605 della SEI Spa, che ha indotto la « v_{MAX} ») variabili indipendenti (figg. da 13 a 15). In tal modo è stato possibile determinare la legge di decadimento della « v_{MAX} » al variare della distanza dal punto di sparo « R » e della quantità di carica « Q ». Le elaborazioni statistiche dei dati misurati hanno fornito i risultati riportati nel seguito.

5.1. Vettore velocità (v_{VETT})

Errore standard della v_{VETT} misurata (s*):	1,23 mm/s
Coefficiente di correlazione (r):	0,89
Numero di misure:	34
Grado di libertà:	31
Coefficienti del percorso sismico (R) e della carica (Q_{MAX}):	-1,99 0,65
Errore standard dei coefficienti:	0,31 0,13

Equazione curva 50% di probabilità: $v_{VETT MAX} = 4810 DS^{-1,99}$
 Equazione curva 95% di probabilità: $v_{VETT MAX} = 7510 DS^{-1,99}$.
 (« v_{VETT} » in mm/s; « DS » in $m/Kg^{0,33}$; « v_{VETT} » compreso tra 1,96 e 9,30 mm/s; « R » compreso tra 51 e 86 m, « Q_{MAX} » compreso tra 2,4 e 9,6 kg).

5. RESULTS OF MONITORING

The measured values were processed by power regression with « v_{MAX} » dependent variable, « R » (seismic path length or distance between shot and measuring spot) and « Q_{MAX} » (weight of the explosive charge: slurry SIGMA 605 from SEI Spa, which has induced the peak particle value « v_{MAX} ») independent variables (fig.s from 13 to 15). In this way it was possible to establish the « v_{MAX} » decay law as a function of seismic path length « R » and charge weight « Q_{MAX} ». Statistical computing of the measured datas has showed the following results.

5.1. Velocity (vector) « v_{VETT} »

Standard error of the measured v_{VETT} (s):	1.23 mm/s
Correlation coefficient (r):	0.89
Number of measures:	34
Degree of freedom:	31
Seismic path length (R) and charge weight (Q_{MAX}) coefficient:	-1.99, 0.65
Standard error of coefficients (R, Q_{MAX}):	0.31, 0.13

Equation of decay law (50% probability): $v_{VETT MAX} = 4810 DS^{-1,99}$
 Equation of decay law (90% probability): $v_{VETT MAX} = 7510 DS^{-1,99}$.
 (« v_{VETT} » in mm/s; « DS » in $m/Kg^{0,33}$; « v_{VETT} » between 1.96 and 9.30 mm/s; « R » between 51 and 86 m, « Q_{MAX} » between 2.4 and 9.6 kg).

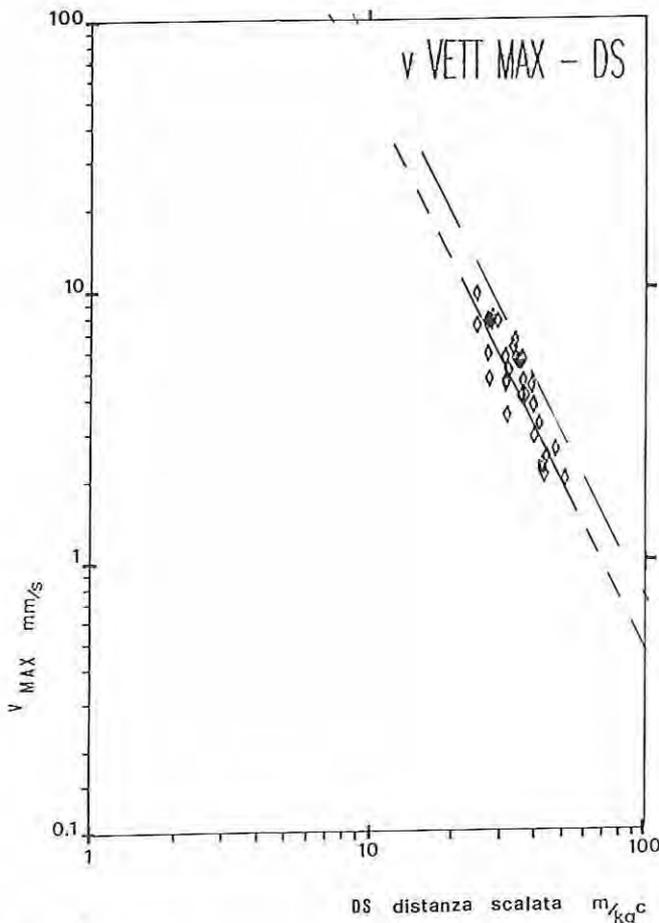


Fig. 13
 Ampiezza massima della velocità delle particelle di terreno al passaggio del transiente sismico (v_{VETT}) al variare della distanza scalata.
 Blast induced ground particle velocity maximum amplitude (v_{VETT} vector velocity) versus scaled distance.

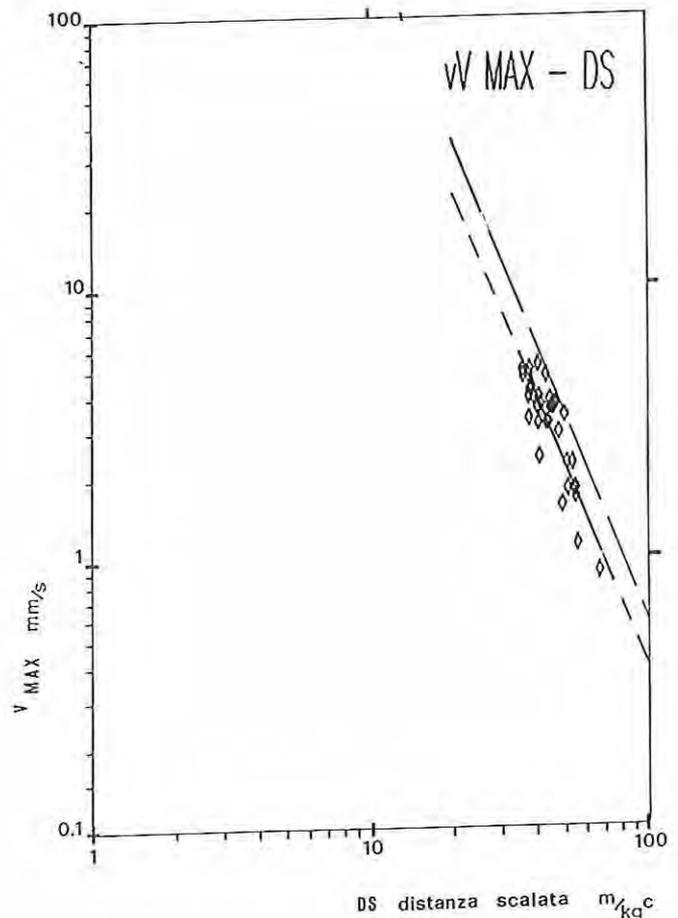


Fig. 14
 C.s. (« v_v » componente verticale della velocità).
 Blast induced ground particle velocity maximum amplitude (« v_v » vector velocity) versus scaled distance.

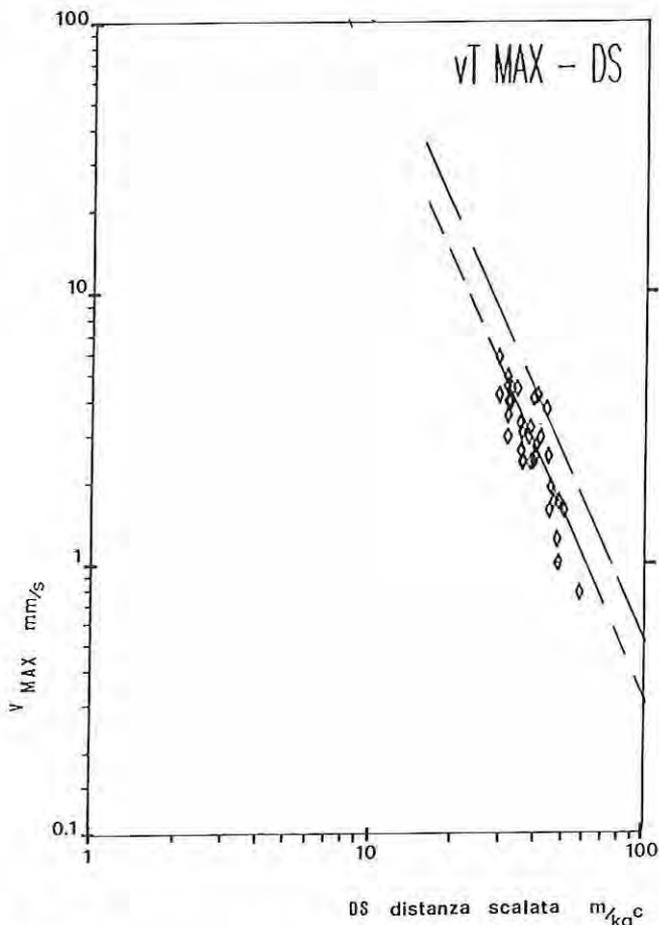


Fig. 15

C.s. (« v_T » componente orizzontale trasversale della velocità).

Blast induced ground particle velocity maximum amplitude (« v_T » horizontal transversal component of velocity) versus scaled distance.

5.2. Componente verticale della velocità (v_V)

Errore standard della v_T misurata (s^*):	1,25 mm/s
Coefficiente di correlazione (r):	0,87
Numero di misure:	34
Grado di libertà:	31
Coefficienti del percorso sismico (R) e della carica (Q_{MAX}):	-2,44 0,40
Errore standard dei coefficienti:	0,33 0,13

Equazione curva 50% di probabilità: $v_{V,MAX} = 30610 DS^{-2,44}$
 Equazione curva 95% di probabilità: $v_{V,MAX} = 44370 DS^{-2,44}$
 (« v_V » in mm/s; « DS » in $m/kg^{0,16}$; « v_V » compreso tra 0,9 e 5,1 mm/s; « R » compreso tra 51 e 86 m, « Q_{MAX} » compreso tra 2,4 e 9,6 kg).

5.3. Componente orizzontale trasversale della velocità (v_T)

Errore standard della v_T misurata (s^*):	1,29 mm/s
Coefficiente di correlazione (r):	0,85
Numero di misure:	34
Grado di libertà:	31
Coefficienti del percorso sismico (R) e della carica per ritardo (Q_{MAX}):	-2,24 0,55
Errore standard dei coefficienti:	0,38 0,15

Equazione curva 50% di probabilità: $v_{T,MAX} = 9275 DS^{-2,24}$
 Equazione curva 95% di probabilità: $v_{T,MAX} = 15080 DS^{-2,24}$
 (« v_T » in mm/s; « DS » in $m/kg^{0,25}$; « v_T » compreso tra 0,8 e 5,7 mm/s; « R » compreso tra 51 e 86 m, « Q_{MAX} » compreso tra 2,4 e 9,6 kg).

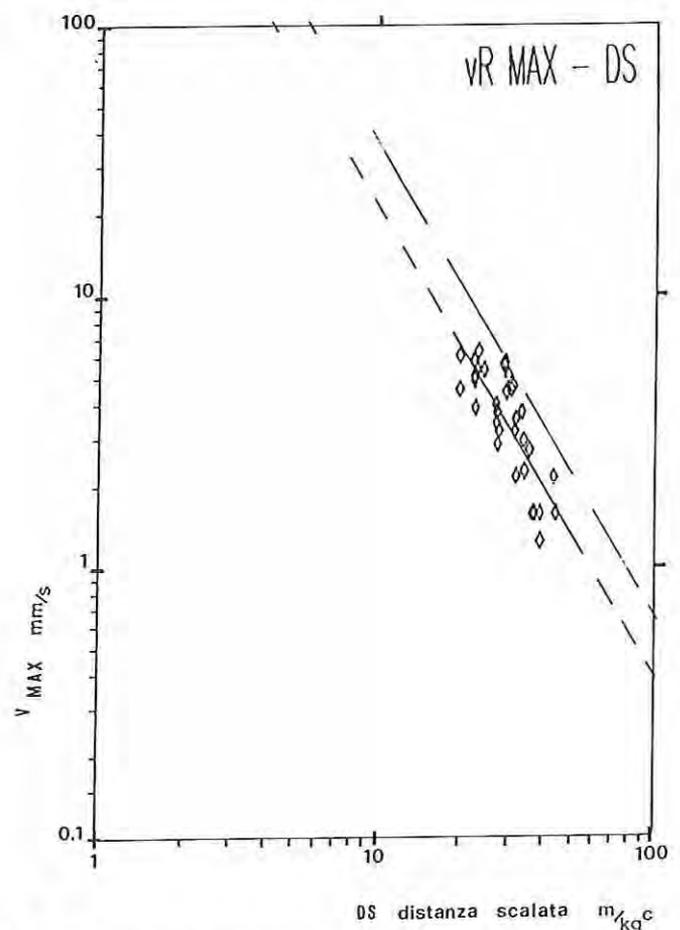


Fig. 16

C.s. (« v_R » componente orizzontale radiale della velocità).

Blast induced ground particle velocity maximum amplitude (« v_R » horizontal radial component of velocity) versus scaled distance.

5.2. Vertical component of velocity (v_V)

Standard error of the measured v_V (s):	1.25 mm/s
Correlation coefficient (r):	0.87
Number of measures:	34
Degree of freedom:	31
Seismic path length (R) and charge weight (Q_{MAX}) coefficients:	-2.44, 0.40
Standard error of coefficients (R , Q_{MAX}):	0.33, 0.13

Equation of decay law (50% probability): $v_{V,MAX} = 30610 DS^{-2,44}$
 Equation of decay law (90% probability): $v_{V,MAX} = 44370 DS^{-2,44}$
 (« v_V » in mm/s; « DS » in $m/kg^{0,16}$; « v_V » between 0.9 e 5.1 mm/s; « R » between 51 and 86 m, « Q_{MAX} » between 2.4 e 9.6 kg).

5.3. Horizontal transversal component of velocity (v_T)

Standard error of the measured v_T (s):	1.29 mm/s
Correlation coefficient (r):	0.85
Number of measures:	34
Degree of freedom:	31
Seismic path length (R) and charge weight (Q_{MAX}) coefficients:	-2.24, 0.55
Standard error of coefficients (R , Q_{MAX}):	0.38, 0.15

Equation of decay law (50% probability): $v_{T,MAX} = 9275 DS^{-2,24}$
 Equation of decay law (90% probability): $v_{T,MAX} = 15080 DS^{-2,24}$
 (« v_T » in mm/s; « DS » in $m/kg^{0,25}$; « v_T » between 0.8 and 5.7 mm/s; « R » between 51 and 86 m, « Q_{MAX} » between 2.4 and 9.6 kg).

5.4. Componente orizzontale radiale della velocità (v_R)

Errore standard della v_R misurata (s^*):	1,32 mm/s
Coefficiente di correlazione (r):	0,81
Numero di misure:	34
Grado di libertà:	31
Coefficienti del percorso sismico (R) e della carica per ritardo (Q_{MAX}):	-1,71 0,72
Errore standard dei coefficienti:	0,41 0,17

Equazione curva 50% di probabilità: $v_{R MAX} = 1080 DS^{-1.71}$
 Equazione curva 95% di probabilità: $v_{R MAX} = 1740 DS^{-1.71}$
 (« v_R » in mm/s; « DS » in $m/kg^{0.42}$; « v_R » compreso tra 1,2 e 6,1 mm/s; « R » compreso tra 51 e 86 m, « Q_{MAX} » compreso tra 2,4 e 9,6 kg).

5.4. Horizontal radial component of velocity (v_R)

Standard error of the measured v_R (s):	1.32 mm/s
Correlation coefficient (r):	0.81
Number of measures:	34
Degree of freedom:	31
Seismic path length (R) and charge weight (W_{MAX}) coefficients:	-1.71, 0.72
Standard error of coefficients (R, Q_{MAX}):	0.41, 0.17

Equation of decay law (50% probability): $v_{R MAX} = 1080 DS^{-1.71}$
 Equation of decay law (95% probability): $v_{R MAX} = 1740 DS^{-1.71}$
 (« v_R » in mm/s; « DS » in $m/kg^{0.42}$; « v_R » between 1.2 and 6.1 mm/s; « R » between 51 and 86 m, « Q_{MAX} » between 2.4 and 9.6 kg).

5.5. Osservazioni sulle misure

I valori della velocità delle particelle di terreno al passaggio del transiente sismico indotto dalle volate di sicurezza non hanno mai superato i 10 mm/s e le frequenze predominanti dell'impulso di picco sono sempre state elevate (> 100 Hz). L'ampiezza delle componenti armoniche del transiente sismico con frequenze inferiori a 100 Hz, non hanno mai raggiunto valori significativi.

Dalla campagna di rilievi deformometrici non è stata rilevata nessuna significativa traslazione dei blocchi della scarpata.

5.5. Remarks on instrumental control

Blast induced particle velocity has never exceeded 10 mm/s and predominant frequencies of the peak pulse were always high (> 100 Hz). Amplitude of harmonic components of seismic transient, with frequencies below 100 Hz, never reached high values.

Monitoring of permanent translation of adjoining blocks showed that not any significant values were measured in the slope under control.

6. DIMENSIONAMENTO DELLE VOLATE DI SICUREZZA

Per l'esecuzione degli spari di prova e l'avvio dei lavori di scavo, non essendo ancora nota la legge di decadimento della v_{MAX} , caratteristica del sito, è stato fatto riferimento ad una legge di decadimento calcolata con valori misurati durante lo scavo di gallerie parietali in ammassi carbonatici di caratteristiche geomeccaniche analoghe a quello di Favignana. Facendo riferimento a questa legge di decadimento, ed in particolare alla curva dei limiti di fiducia al 95%, è stata quindi inizialmente adottata una distanza scalata di sicurezza « DSs » pari a $36 m/kg^{0.5}$ (relativa ad esplosivo con weight strength « WS » pari all'85%, preso a riferimento con fattore d'efficienza « EF » pari ad 1).

Con questa distanza scalata di sicurezza era atteso, in pros-

6. THE SAFETY ROUNDS

For blasting trial rounds and for starting up tunnelling excavation, having not yet known the « v_{MAX} » decay law characteristic of the site, it has been referred to a decay law computed with values measured in blasting for excavating parietal tunnels. Referring to this decay law, and particularly to the 95% confidence limit, at the beginning it was adopted a safety scaled distance « DSs » of $36 m/kg^{0.5}$ (for explosives

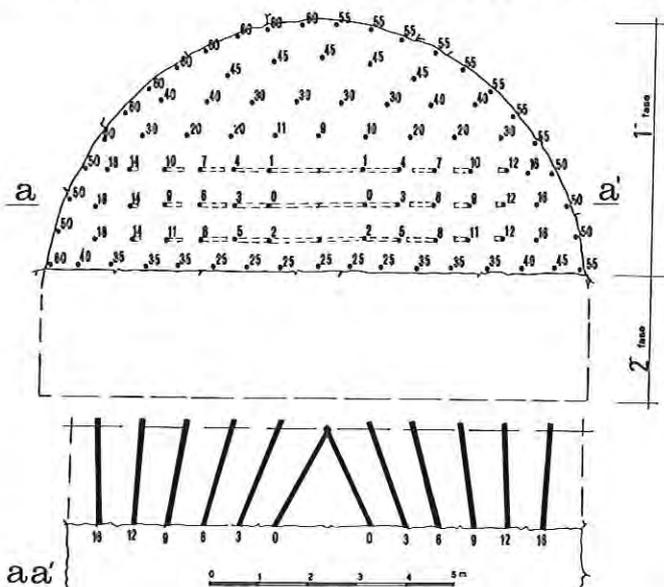


Fig. 17
Volata d'abbattimento adottata nella sezione del tunnel più vicina alla scarpata: prima fase, sezione superiore. (Vedi anche tabella 1).
Blast round in the tunnel section nearest to the slope: first phase, upper section. (See also table 1).

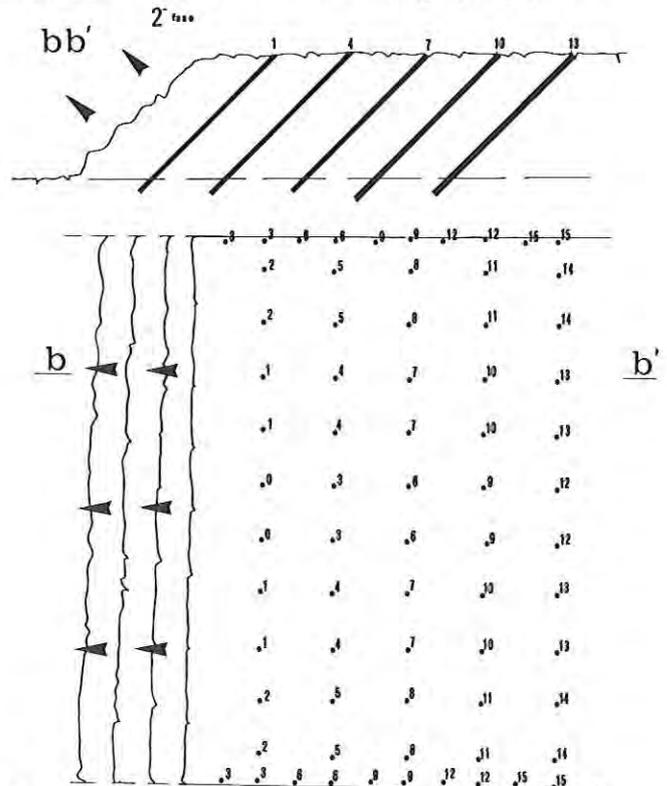


Fig. 18
Volata d'abbattimento adottata nella sezione del tunnel più vicina alla scarpata: seconda fase, sezione inferiore. (Vedi anche tabella 2).
Blast round in the tunnel section nearest to the slope: second phase, lower section. (See also table 2).

Tabella 1 - Volata d'abbattimento adottata in prossimità della scarpata / Table 1 - Blast round in the tunnel section nearest to the slope

1^a fase: Sezione superiore / 1st phase: Upper section

Altezza della sezione - Section height	5.5 m
Larghezza della sezione - Section width	11 m
Diametro del foro - Hole diameter	51 mm
Lunghezza del foro - Hole length	dal/rom 2.3 alto 2.1 m
Detonatori - Detonators	NONEL GT/T da/by NITRO NOBEL
Esplosivo - Explosive	slurry SIGMA 605 da/by SEI SPA
Cartucce per foro - Cartridges per hole	dal/rom 4 ad/ro 1 (Ø 40; l: 400 mm)
Carica di esplosivo per foro - Explosive charge per hole	dal/rom 2.4 a/ro 0.6 kg
Carica specifica - Specific explosive charge	1.6 kg/m ³
Perforazione specifica - Specific drilling	2.2 m/m ³

Tabella di caricamento / Charging table

ritardo (× 100 ms) time delay (× 100 ms)	carica esplosiva per ritard. (kg) explosive charge per delay (kg)	carica esplosiva per foro (kg) explosive charge per hole (kg)	numero di fori number of holes	cartucce per foro cartridges per hole	lungh. del foro (m) hole length (m)
0	4.8	2.4	2	4	2.3
1	4.8	2.4	2	4	2.3
2	4.8	2.4	2	4	2.3
3	4.8	2.4	2	4	2.3
4	4.8	2.4	2	4	2.3
5	4.8	2.4	2	4	2.3
6	4.8	2.4	2	4	2.2
7	4.8	2.4	2	4	2.2
8	4.8	2.4	2	4	2.2
9	6.0	2.1/1.8	2/1	3.5/3	2.2
10	6.0	2.1/1.8	2/1	3.5/3	2.2
11	6.0	2.1/1.8	2/1	3.5/3	2.2
12	6.3	2.1	3	3.5	2.1
14	6.3	2.1	3	3.5	2.1
16	6.3	2.1	3	3.5	2.1
18	6.3	2.1	3	3.5	2.1
20	7.2	1.8	4	3	2.1
25	7.2	1.2	6	2	2.1
30	7.2	1.2	6	2	2.1
35	7.2	1.2	6	2	2.1
40	7.2	1.2	6	2	2.1
45	7.2	1.2	6	2	2.1
50	7.2	1.2	6	2	2.1
55	7.3	0.6/1.5	8/1	1/2.5	2.1
60	7.3	0.6/1.5	8/1	1/2.5	2.1

similità della scarpata da salvaguardare, con probabilità superiore al 95%, un valore della v_{MAX} inferiore a 12 mm/s e, con probabilità superiore al 50%, un valore della v_{MAX} inferiore a 4,5 mm/s.

La massima carica ammessa a brillare per ritardo fu pertanto inizialmente posta pari a:

$$Q_{MAX} = (R/36)^{10.5} / FE$$

con $EF = 0,95$ (fattore d'efficienza dell'esplosivo impiegato).

Attraverso il continuo controllo strumentale (per garantire valori della velocità inferiori a 12 mm/s) il quantitativo massimo d'esplosivo per ritardo è stato progressivamente aumentato sino a quando, definita la legge di decadimento caratteristica del sito, facendo riferimento alla retta dei limiti di fiducia al 95% del vettore velocità « v_{VETT} » (fig. 13) non è stata adottata la distanza scalata di sicurezza «DSS» pari a 25,4 m/kg^{0.33}.

with weight strength «WS» equal to 85%, assumed as reference with efficiency factor «EF» of 1).

With the adopted safety scaled distance it was expected, close to the slope to safeguard, a value of the « v_{MAX} » below 12 mm/s (over 95% probability) and below 4.5 mm/s (over 50% probability).

At the beginning the maxim explosive charge blasted per delay was, therefore, imposed to be equal to:

$$Q_{MAX} = (R/36)^{10.5} / FE$$

were $EF = 0.95$ (explosive efficiency factor equal to the ratio between the weight strengts of the used explosive and that of the reference explosives).

The charge weight per delay was improved (keeping values of induced ground velocity below 12 mm/s) since when it was defined the decay law characteristic of the site. Referring to the velocity vector « v_{VETT} » 95% confidence limit (par. 5.1. fig. 13), it was than adopted a safety scaled distance «DSS» of 25.4 m/kg^{0.33}.

Tabella 2 - Volata d'abbattimento adottata in prossimità della scarpata / Table 2 - Blast round in the tunnel section nearest to the slope
 2ª fase: Sezione inferiore / 2nd phase: Lower section

Altezza della sezione - <i>Section height</i>	2.5 m
Larghezza della sezione - <i>Section width</i>	11.6 m
Diametro del foro - <i>Hole diameter</i>	64 mm
Lunghezza del foro - <i>Hole length</i>	3.7 m
Inclinazione del foro - <i>Hole dip</i>	45°
Spalla apparente - <i>Apparent burden</i>	1.5 m
Spalla pratica - <i>Practical burden</i>	1 m
Interasse dei fori - <i>Hole spacing</i>	1.1 m
Detonatori - <i>Detonators</i>	NONEL UNIDET da/by NITRO NOBEL
Esplosivo - <i>Explosive</i>	slurry SIGMA 605 da/by SEI SPA
Cartucce per foro - <i>Cartridges per hole</i> *	4 (0.6 kg ciascuna/each)
Carica di esplosivo per foro - <i>Explosive charge per hole</i>	2.4 kg
Carica specifica - <i>Specific explosive charge</i>	0.55 kg/m ³
Perforazione specifica - <i>Specific drilling</i>	0.85 m/m ³
Spalla pratica profilatura - <i>Contour practical burden</i>	0.55 m
Interasse fori profilatura - <i>Contour hole (vertical) spacing</i>	1.1 m
Esplosivo - <i>Explosive used</i>	miccia detonante/detonating cord SEICORD 80 (pentrite 80 gr/m) da/by SEI SPA
Spezzoni per foro - <i>String per hole</i>	1 di/of 2 metri/meters
Carica esplosiva per foro - <i>Explosive charge per hole</i>	0.16 kg
Carica specifica - <i>Specific explosive charge</i>	0.12 kg/m ³
Perforazione specifica - <i>Specific drilling</i>	0.16 m/m ³

* Tutti i fori sono stati intasati - *Holes were all stemmed with sand*

Tabella di caricamento / Charging table					
Ritardo (× 25 ms) <i>Time delay (× 25 ms)</i>	Carica esplosiva per ritar. (kg) <i>Explosive charge per delay (kg)</i>	Carica esplosiva per foro (kg) <i>Explosive charge per hole (kg)</i>	Numero di fori <i>Number of holes</i>	Cartucce per foro <i>Cartridges per hole</i>	Lungh. del foro (m) <i>Hole length (m)</i>
0	4.8	2.4	2	4	3.7
1	9.6	2.4	4	4	3.7
2	9.6	2.4	4	4	3.7
3	4.8/0.64	2.4/0.24	2/4	4/1	3.7/2.5
4	9.6	2.4	4	4	3.7
5	9.6	2.4	4	4	3.7
6	4.8/0.64	2.4/0.24	2/4	4/1	3.7/2.5
7	9.6	2.4	4	4	3.7
8	9.6	2.4	4	4	3.7
9	4.8/0.64	2.4/0.24	2/4	4/1	3.7/2.5
..	9.6	2.4	4	4	3.7
..	9.6	2.4	4	4	3.7
..	4.8/0.64	2.4/0.24	2/4	4/1	3.7/2.5

7. CONCLUSIONI

Con il ricorso alla tecnica dell'abbattimento controllato con esplosivi è stato possibile effettuare lo scavo della galleria in un ammasso con scarpate in precarie condizioni di equilibrio statico senza creare soggezioni particolari ai lavori.

Lo scavo della galleria è avvenuto, comunque, in condizioni di avanzamento ridotto rispetto alle produzioni possibili in una galleria di pari sezione. Ciò in conseguenza delle modalità di abbattimento della roccia imposta a salvaguardia della stabilità dell'ammasso.

7. CONCLUSIONS

With controlled blasting technique and instrumental control of induced seismicity it was possible to perform excavation with explosives of a tunnel close a rock mass with slope in unstable conditions.

This was also possible without imposing any particular restriction to the work.

Excavation was conducted, anyway, with a production lower than that possible in similar tunnel excavated in less «delicate environment».

Il controllo strumentale, oltre a verificare la correttezza delle ipotesi formulate in fase di progetto e garantire il rispetto delle rigorose condizioni di sicurezza, ha permesso di ottimizzare i parametri caratteristici della volata permettendo di conseguire, nel complesso, economie di produzione.

8. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il dottor geologo Salvatore Ricco, Capo Servizio Geologico e Geofisico della Sicilia, i dottori geologi Gian Cristoforo Galia e Gualtiero Bellomo per la competente collaborazione nel corso dei lavori.



That of seismic monitoring has showed to be a useful practice both for verifying accuracy of the project hypothesis and the respect of the safety rules imposed for slope safeguard. It has also made possible, by optimization of parameters characteristics of the blast round, appreciable production savings.

8. ACKNOWLEDGEMENTS

The writers would like to gratefully acknowledge Dott. Geologist Salvatore Ricco (Chief of the Geological and Geophysical Office of Sicily), Dott.s Geologists Gian Cristoforo Galia and Gualtiero Bellomo for the qualified cooperation.



BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

AMBRASEYS N., HENDRON J. (1968). *Dynamic behaviour of rock masses in rock mechanics in engineering practice*. John Wiley & Sons.

CHOWDHURY R. N. (1978). *Slope analysis*. Elsevier Publishing Company.

ELGAMAL A. W. M., SCOTT F. R., SUCCARIEH M. F., YAN L. (1990). *La Villita dam response during five earthquakes including permanent deformation*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.

HARRIES G. (1981). *Blasting to achieve slope stability in weak rock*. 3rd Int. Conf. on stability in surface mining, Soc. of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc., N. Y.

HOEK E., BRAY J. M. (1977). *Rock slope engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy, London.

KOLSKY H. (1963). *Stress waves in solids*. Dover Publ. Inc.

LAMA R. O., VUTUCURI V. S. (1978). *Handbook of mechanical properties of rocks*. Trans Tech Publications, vol. II.

LUNDBORG N. (1980). *Some view on the effect of ground vibration on slope stability*. SVEDEFO.

ORIARD L. L. (1981). *Influence of blasting on slope stability; state of the art*. 3rd Int. Conf. on stability in surface mining, Soc. of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc., N. Y.

PITEAU D. R., MARTIN C. D. (1981). *Mechanics of rock slope failure*. 3rd Int. Conf. on stability in surface mining, Soc. of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Inc. N. Y.

RICHERT F. E., HALL J. R., WOODS R. D. (1970). *Vibrations of soil and foundations*. N. M. Newmark, N. J. Hall Editors.

RINEHART J. S. (1975). *Stress transient in solids*. Hyper Dynamics, Santa Fe, New Mexico.