POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Indagini sperimentali per l’ottimizzazione di scavi a cielo aperto in prossimità di un'area sensibile e densamente popolata

Original
Indagini sperimentali per l’ottimizzazione di scavi a cielo aperto in prossimità di un'area sensibile e densamente popolata / Cardu, M., Deangeli, C., Martinelli, D.. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - 159:1(2020), pp. 26-32.

Availability:
This version is available at: 11583/2852525 since: 2020-11-12T14:29:28Z

Publisher:
Patron Editor

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

09 November 2026

Indagini sperimentali per l'ottimizzazione di scavi a cielo aperto in prossimità di un'area sensibile e densamente popolata

Marilena Cardu*,**
Chiara Deangeli*
Daniele Martinelli*

* DIATI, Politecnico di Torino
** IGG-CNR, Torino

Lo studio presenta i risultati di una campagna sperimentale svolta presso la miniera di Sasso Poiano (VA). L'area è in prossimità di un sito storico, di centri abitati e di un noto lago, per cui l'impiego di esplosivo è soggetto a restrizioni molto severe imposte dalle norme adottate in Italia: la coltivazione ha quindi subìto notevoli variazioni nel corso del tempo, e attualmente è effettuata mediante preminaggio, al solo scopo di pre-fratturare l'ammasso roccioso e favorire lo scavo meccanico mediante escavatori a benna rovescia. Il principale obiettivo della campagna sperimentale è stato quello di testare nuove tecniche per l'ampliamento della miniera, riducendo i costi operativi ed incrementando l'efficienza del sistema, con il vincolo, però, di rispettare gli standard di produttività precedentemente raggiunti. In particolare, sono stati effettuati numerosi tiri di prova, allo scopo di ottenere una legge di sito rappresentativa e idonea a fornire indicazioni sulla massima carica per ritardo (CPD) da impiegare per rispettare i limiti di PPV (peak particle velocity). Sono state, in seguito, effettuate 9 volate, allo scopo di valutare due opzioni: variazione della CPD e/o modifica della geometria della volata (maglia di tiro). La distribuzione dell'abbattuto è stata analizzata mediante analisi d'immagine, al fine di valutare la soluzione migliore. I risultati hanno consentito di verificare la migliore configurazione di scavo, unitamente alla scelta di impiegare un singolo escavatore a benna rovescia, di dimensioni inferiori a quelli attualmente impiegati: tale opzione consente una riduzione del costo di carburante di circa il 40%, unitamente a minori costi di manutenzione del parco macchine.

***Parole chiave**: scavo con esplosivo; vibrazioni indotte; prove di tiro, carica per ritardo; velocità di vibrazione, attrezzature di cava.*

***Titolo in inglese.** The paper presents the results of an experimental campaign carried out at the Sasso Poiano mine, close to Varese, northern Italy. The area is near a historic site, inhabited villages and a well-known lake, so that the use of explosive is subject to severe restrictions imposed by Italian standards. The exploitation is therefore carried out by blasting with low specific charge (PF=50 g/m3) in order to obtain pre-fracturing of the rock, which is followed by mechanical excavation through backhoe excavators. The goal of the study was to test new techniques for the expansion of the mine, in order to reduce the production costs and increase the efficiency of the site, maintaining the same level of production as previously achieved by standard bench blasting. The hypothesis to be tested was that of introducing new equipment, able to ensure the productivity of the plant with lower operating costs and maintenance. 28 blast tests have been performed, with the aim of obtaining a site law suitable to describe the behaviour blast-induced vibrations within the marlstone and therefore allow to predict the maximum allowable CPD to respect legal limits of PPV. Afterwards, 9 blasts were selected, carried out by to evaluate two options: varying the charge per delay (CPD) and/or the geometry of the drilling mesh. The grain size distribution of the blasted material was analysed through a photogrammetric technique, in order to evaluate the best solution to be taken. The results allowed to determine the best blasting configuration, together with the purchase of a single backhoe excavator, smaller than those currently adopted: this choice allows to reduce the fuel cost by about 40%, in addition to lower costs of the equipment maintenance..*

Keywords: *Drill & Blast Excavation; Blast induced Vibrations; Blast Tests; Charge per Delay; Peak Particle Velocity; Quarry Equipment.*

1. Introduzione

L'attività estrattiva in Italia è condizionata, ormai da qualche tempo, da un ambiente sempre più antropizzato: ciò genera la necessità di individuare una relazione sostenibile tra il rispetto della produttività e l'esigenza di proteggere le aree circostanti i cantieri: ciò induce, naturalmente, restrizioni sui siti estrattivi in termini di impatto ambientale, quali rumore, vibrazioni, polvere, proiezioni di frammenti rocciosi, airblast e così via, che comportano generalmente un aumento dei costi. Affinché le operazioni di scavo possano essere considerate, in tali condizioni, economicamente compatibili, gli aspetti chiave sono un'elevata produttività e costi di produzione controllati. Il sito in esame è una miniera a cielo aperto di marna da cemento. Avviata negli anni '950, la miniera è stata oggetto di molteplici evoluzioni: in Tabella 1 se ne riporta la cronologia. Fino agli anni '980, la coltivazione avveniva su gradoni di circa 15 m di altezza impiegando il solo esplosivo, con cariche per ritardo (CPD) comprese tra 30 e 40 kg e consumi specifici (PF) dell'ordine di 300-350 g/m^3. Vennero in seguito proposte diverse soluzioni per ridurre rumore e vibrazioni, tra cui l'impiego di un sistema "ripper – dozer", lo scavo con martelli demolitori idraulici o mediante surface miners. Tali proposte vennero scartate a causa dei limiti produttivi imposti dall'impiego del solo scavo meccanico. La successiva scelta di utilizzare escavatori idraulici a benna rovescia di grande potenza si è rivelata sufficiente al soddisfacimento della produttività necessaria e, pertanto, si è deciso di adottare una tecnica mista, consistente nell'impiego di preminaggio (per limitare la CPD) e di mezzi meccanici, riducendo l'altezza dei gradoni. La differenza, in termini di geometria di scavo, è mostrata in Figura 1.

Tab. 1. Evoluzione cronologica dei metodi di coltivazione nella miniera in esame.
Chronology of the exploitation methods of the quarry under study.

Periodo	Altezza del gradino [m]	Tipo di volata	Maglia di tiro [m^2]	P.F. [kg/m^3]	CPD [kg/ritardo]
1950-1980	15	Produzione	n/a	0,30-0,35	30-40
1980-1990	5	Preminaggio	4 x 5	0,04	5
1990-2016	5	Preminaggio	2,5 x 2,7	0,12	7
2016-2018	5	Preminaggio	2 x 2	0,18	7

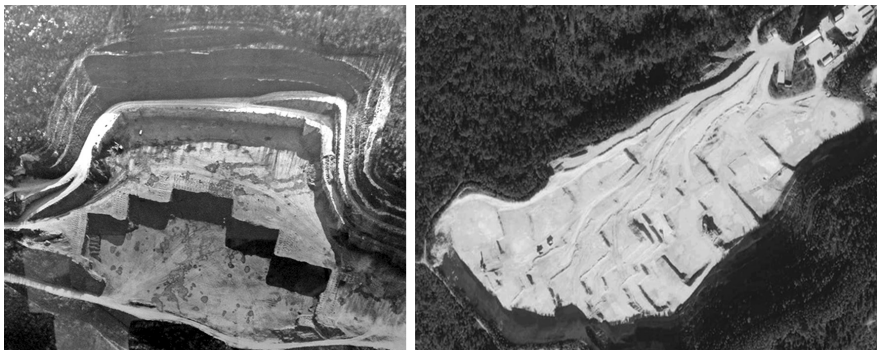


Fig. 1. A sinistra: Configurazione della miniera prima del 1980; a destra: configurazione attuale, a gradino basso.
Left: The quarry layout previous to the 1980; Right: Current quarry layout, mining by horizontal descending benches.

1. Metodologia di ricerca

A causa della presenza dei numerosi vincoli, è necessario, come anticipato, rispettare restrizioni piuttosto severe imposte dalle norme vigenti o dalle autorità locali:

- PPV max consentita: 1 mm/s ai confini della concessione, per limitare i reclami della popolazione locale;
- Dai tiri di prova effettuati, il rispetto di tale PPV comporta una CPD max = 21 kg/ritardo
- La miniera non è autorizzata a detenere un deposito esplosivi e, pertanto, tutti i materiali necessari (cariche e inneschi) devono essere trasportati sul posto poco prima della volata, e il materiale in eccesso deve essere distrutto.

Durante il presente studio sono state quindi considerate due principali opzioni: l'opportunità di modificare la CPD e, separatamente, l'opportunità di variare il P.F., modificando la maglia di tiro.

1.1. Modifica della CPD

Parte della ricerca ha riguardato la valutazione della distribuzione granulometrica dei frammenti tramite analisi d'immagine. Dopo il preminaggio, il volume pre-minato rimane in posto, in quanto l'obiettivo è limitato all'esigenza di ottenere una pre-fratturazione della roccia, senza dislocarla e/o spostarla dalla sua sede; si ricorre quindi alla fotogrammetria solo dopo avere effettuato lo scavo meccanico. La valutazione della dimensione dei frammenti non è, di conseguenza, un'indicazione direttamente ascrivibile all'effetto indotto dall'esplosivo: è piuttosto un indicatore della cooperazione tra l'energia resa disponibile dall'esplosivo e quella dovuta allo scavo meccanico. Il risultato dopo l'applicazione della tecnica mista descritta è osservabile, esemplificativamente, nella sequenza di Figura 2. In Tabella 2 sono forniti, a scopo esemplificativo, i risultati relativi a 3 delle volate di produzione effettuate durante la ricerca (il cui dettaglio è fornito in appendice).

Il brillamento simultaneo fra mine adiacenti (pre-splitting o smooth blasting) è generalmente adottato allo scopo di favorire il guidaggio della frattura (Cardu *et al.*, 2015a e 2015b, Seccatore *et al.*, 2015) ed è quindi, in genere, considerato un inconveniente quando

Fig. 2. A sinistra, preparazione di una volata di preminaggio; al centro: vista in pianta degli strati di marna sub-verticali sconnessi grazie all'azione dell'esplosivo; a destra: rimozione del materiale mediante escavatore.
Left: preparation of a weakening blast; Center: plan view of the sub-vertical marl layers disconnected by the action of the explosive; Right: removal of the material by means of an excavator.

Tab. 2. Confronto fra i risultati di 3 volate effettuate nel corso della ricerca.
Comparison of the results of 3 blasts carried out during the research.

% Passante	Volata 1					Volata 2					Volata 3					Costanti per tutte le volate	
	Dimensione [cm]	N. mine brillate simultaneamente	CPD max [kg/delay]	Distanza volata – geofono[m]	PPV [mm/s]	Dimensione [cm]	N. mine brillate simultaneamente	CPD max [kg/delay]	Distanza volata – geofono[m]	PPV [mm/s]	Dimensione [cm]	N. mine brillate simultaneamente	CPD max [kg/delay]	Distanza volata – geofono[m]	PPV [mm/s]	P.F. [kg/m^3]	Maglia di tiro [m^2]
D_{10}	2.99					0.95					1.55						
D_{20}	5.55					2.35					3.12						
D_{30}	7.84					3.97					4.71						
D_{40}	10.03					5.84					6.28						
D_{50}	12.31					7.92					7.96						
D_{60}	14.99	2	7	270	Sotto la soglia di trigger	10.35	4	14	330	0,762	9.83	6	21	320	0,762	0,12	2,7 x 2,5
D_{70}	18.46					13.60					12.01						
D_{75}	20.65					15.80					13.33						
D_{80}	23.28					18.63					14.91						
D_{90}	31.91					27.63					20.14						
D_{100}	66.82					57.99					44.69						

l'obiettivo è la frammentazione del volume che compete alla volata. Tuttavia, cariche simultanee (o brillate a gruppi) sono frequentemente adottate in volate di preminaggio, specie quando l'ammasso roccioso presenta piani di discontinuità sub-verticali come nel caso in studio (fig. 2, al centro). In questo caso, il brillamento simultaneo di gruppi di mine perforate parallelamente alle discontinuità principali può favorire l'apertura delle fratture naturali preesistenti, facilitando il successivo lavoro dell'escavatore.

Tuttavia, per altri versi il brillamento simultaneo di più mine contribuisce ad aumentare la CPD e, conseguentemente, la PPV. Peraltro, quando si ha a che fare con la risposta umana alle vibrazioni indotte da volate di mine, la PPV non è tanto importante quanto la percezione soggettiva: l'aumento del numero di mine brillate simultaneamente riduce la durata totale dell'evento, e ciò comporta una percezione personale nell'insieme più lieve (Turunen-Rindel *et al.*, 2017). Le vibrazioni e il rumore prodotti sono di bassa intensità, che si brillino contemporaneamente 2 o 6 mine/ritardo. Pertanto, per uno stesso ordine di grandezza di intensità, si può ipotizzare che una sollecitazione di maggiore durata possa essere percepita come più intensa di una con durata più breve. Come prova indiretta di questa considerazione, durante il periodo della campagna sperimentale (circa 6 mesi), non si sono verificati reclami da parte delle comunità circostanti.

1.2. Modifica del consumo specifico PF

La strategia alla base dell'idea di variare il P.F. può essere sintetizzata come segue:

- Ridurre la maglia di tiro per migliorare la frammentazione della roccia
- Una maglia di tiro minore comporta costi di perforazione maggiori e un minore volume di abbattuto ma, d'altra parte:
- Una migliore frammentazione aumenta la produttività del successivo ciclo di scavo meccanico
- Con una produttività più elevata, le macchine impiegate per lo scavo meccanico presentano un migliore rendimento, compensando l'aumento dei costi di perforazione e il ridotto volume abbattuto.

Un quadro riassuntivo della situazione relativa al parco macchine, in termini di impiego attuale e di soluzioni migliorative proposte, è riportata in Tabella 3.

2. Risultati

In sintesi, grazie alle modifiche introdotte al sistema di produzione, sono stati ottenuti i seguenti risultati, ascrivibili a miglioramenti:

– Riduzione del 60% del consumo di unità di connessione
– Riduzione del 40% del consumo di carburante per l'escavatore

Tab. 3. Proposta di modifiche al parco macchine.
Equipment fleet adjustments.

	Parco macchine	Potenza [kW]	Peso operativo [t]	Numero	Condizioni
Parco macchine attuale	Escavatore a benna rovescia	949	234	2	Consumo di carburante 120 l/h
	Escavatore a benna rovescia	111	23	1	-
	Dumper	567	44	2	Capacità produttiva >1000 t/h; se necessario = 800 t/h)
	Dumper	504	38	2	
	Dumper	313	29	1	
	Perforatrice	168	14	1	Necessario garantire 180 mine/volata con 2 aste, ciascuna da 3 m
	Perforatrice	172	18	1	
	Pala caricatrice	169	18	1	
Modifiche proposte	Escavatore a benna rovescia	565	128	1	Consumo di carburante 70 l/h (-40%)
	Escavatore a benna rovescia	111	23	1	-
	Dumper	567	44	2	Adeguata a garantire capacità produttiva di 800 t/h con frammentazione migliore
	Dumper	313	29	1	
	Perforatrice	172	18	1	Modificata per consentire aste da 4.5 m
	Pala caricatrice	169	18	1	-

– Riduzione del 50% dei costi di esercizio della perforazione
– Riduzione del 30% dei costi di gestione dei dumper

3. Conclusioni

La campagna sperimentale descritta era finalizzata a valutare le condizioni in base alle quali un'operazione di scavo a cielo aperto può essere praticabile nonostante le restrizioni di un ambiente fortemente antropizzato come l'Italia. I risultati mostrano che tale opzione è perseguibile, a patto che venga analizzata nel suo complesso, integrando l'adeguamento dei metodi di coltivazione, delle tecniche di scavo e della gestione strategica del parco macchine. I risultati ottenuti hanno evidenziato che l'impiego di una CPD di 21 kg (corrispondente al brillamento simultaneo di 6 mine) associata ad una maglia di tiro di 2 x 2 m, garantisce una riduzione significativa della pezzatura del materiale. Tale configurazione permette inoltre di non arrecare disturbi all'abitato circostante, in quanto garantisce una durata ridotta e fornisce valori di PPV sempre inferiori a 1.5 mm/s. Gran parte dell'energia rilasciata durante il brillamento viene utilizzata per la frammentazione della roccia e conseguentemente le dissipazioni sotto forma di rumore e vibrazioni sono ridotte. In Tabella 4 si sintetizzano le differenze tra il piano di tiro normalmente adottato e quello proposto a seguito delle prove sperimentali condotte.

L'unico svantaggio è dato dalla riduzione del volume della volata, che risulta mediamente di 1500 m^3. Apportando le modifiche proposte, qualora si volesse mantenere invariato il volume di materiale estratto, sarebbe necessario realizzare 75 fori aggiuntivi e acquistare ulteriori 250 kg di esplosivo. Il tempo necessario alla perforazione di ulteriori 75 fori, qualora fossero apportate le modifiche proposte alla perforatrice, sarebbe di circa 180', considerando anche tempi medi di manovra e posizionamento.

Utilizzando il nuovo escavatore (Liebherr R9150) i costi di gestione sarebbero più bassi rispetto al Liebherr R994 (ad oggi impiegato); il risparmio ottenuto dal solo consumo di carburante nell'utilizzo di un escavatore, 2 dumper e un carro di perforazione coprirebbe i costi di acquisto dell'esplosivo aggiuntivo e della perforazione.

Tali dati sono cautelativi: infatti, qualora si valutasse anche il risparmio energetico dell'impianto di frantumazione, i costi di manutenzione dei mezzi di scavo, nonché il loro maggiore coefficiente di utilizzazione, i vantaggi sarebbero ancora più elevati.

Tab. 4. Confronto fra il piano di tiro attualmente impiegato e quello proposto.
Comparison between the current and the suggested blasting plan.

Piano di tiro attuale	Piano di tiro proposto
Maglia: 2.7 x 2.5 m	Maglia: 2 x 2 m
CPD: 7 kg	CPD: 21 kg
PF medio: 0.12 kg/m^3	PF medio: 0.18 kg/m^3
Dimensione media del passante D_{75}: 20.65 cm	Dimensione media del passante D_{75}: 7.83 cm

Riferimenti bibliografici

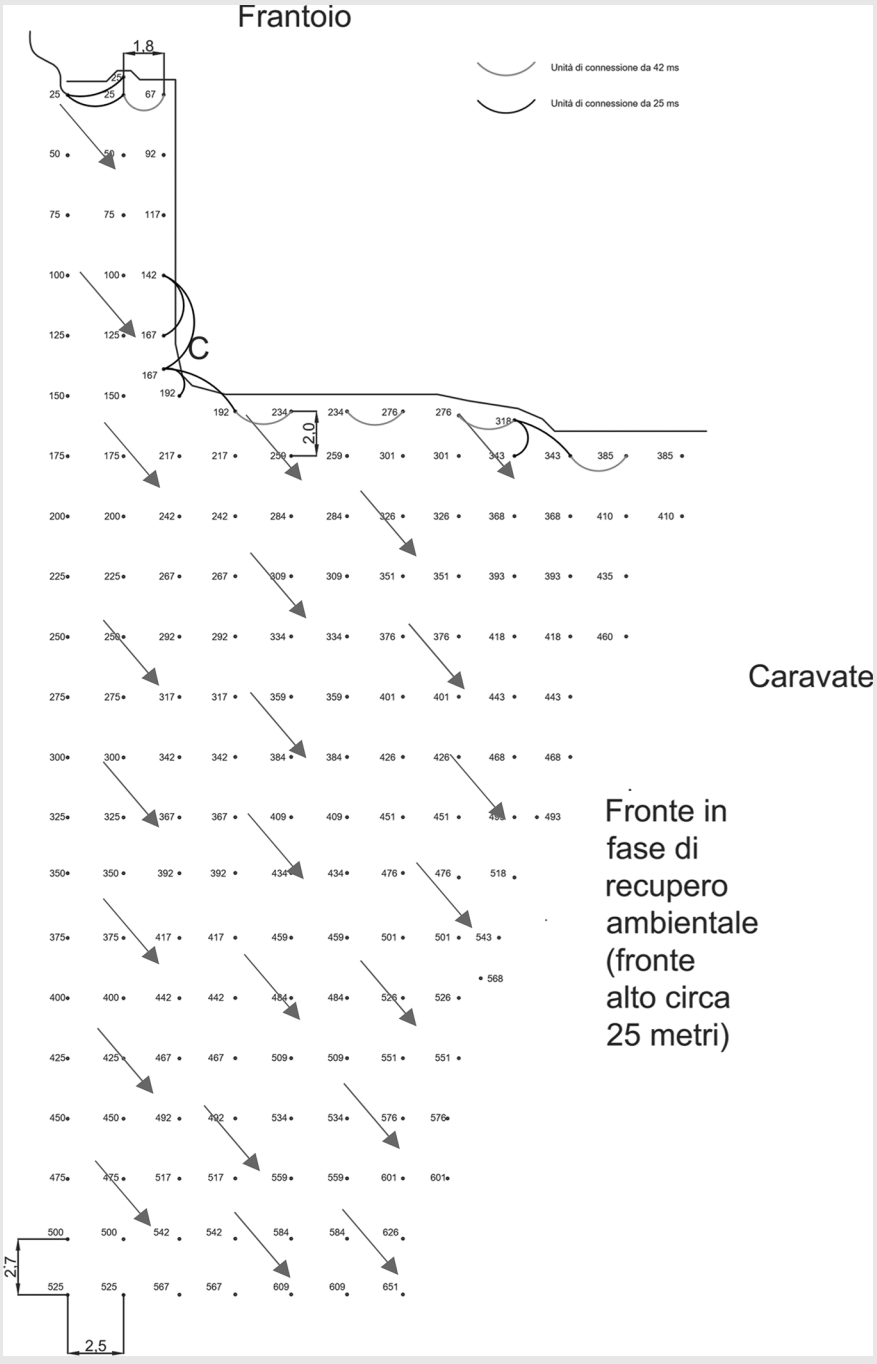
Cardu, M., Seccatore, J., Vaudagna, A., Rezende, A., Galvão, F., Bettencourt, J., De Tomi, G., 2015a. *Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting – Part I*. REM: Rev. Esc. Minas vol. 68 n. 3.

Cardu, M., Seccatore, J., Vaudagna, A., Rezende, A., Galvão, F., Bettencourt, J., De Tomi, G., 2015b. *Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting – Part II*. REM- Revista Escola de Minas, Ouro Preto, vol. 68 n. 4.

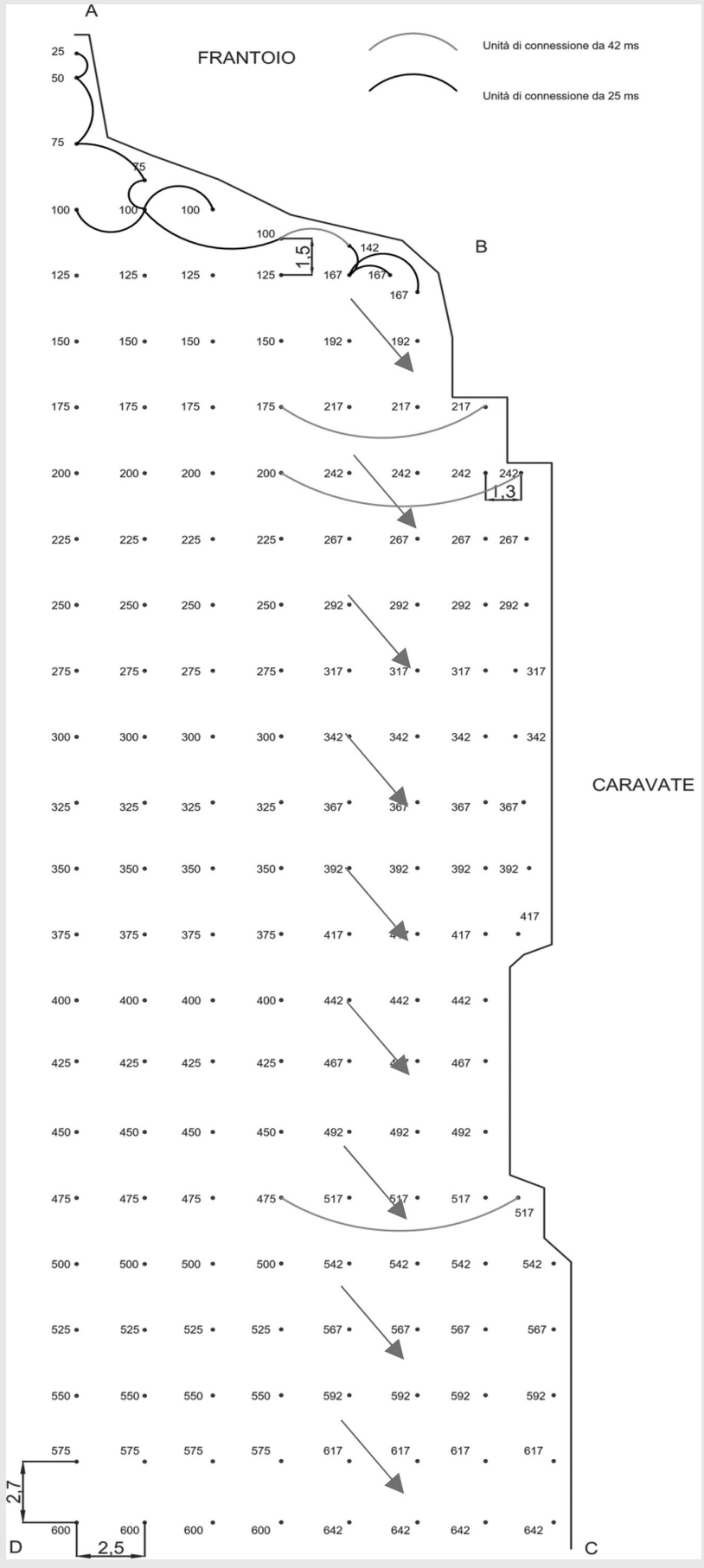
Turunen-Rindel, I., Klæboe, R., Norén-Cosgriff, K., 2017. *Study on human reactions to vibration from blast-ing activities nearby dwellings*. 12th IC-BEN Congress on Noise as a Public Health Problem. Zurich, June 18-22.

Seccatore, J., Cardu, M., Bettencourt, J., 2015. *The Music of Blasting*. Proceedings of the 2015 Sustainable industrial processing summit, 4-9 October 2015, Antalya, Turkey, Flogen stars outreach (Publisher), vol. 4, pp. 193-205. ISSN 2291 1227.

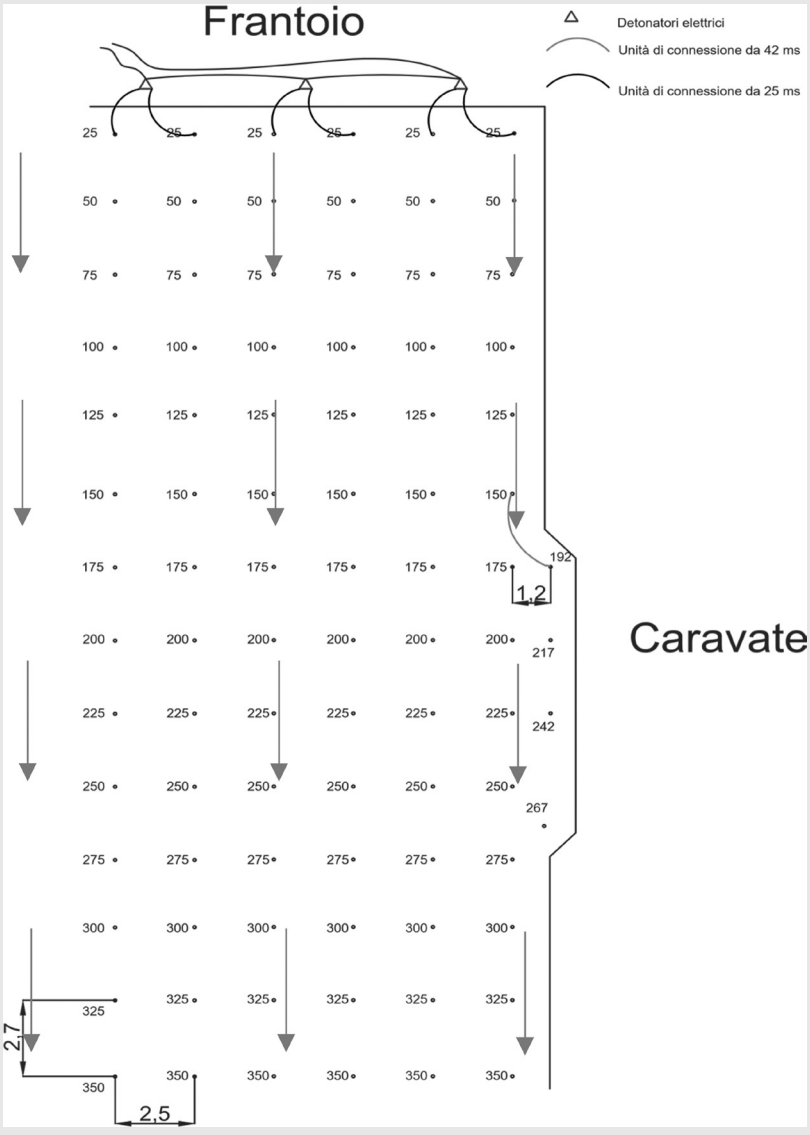
Appendice – Piani di tiro



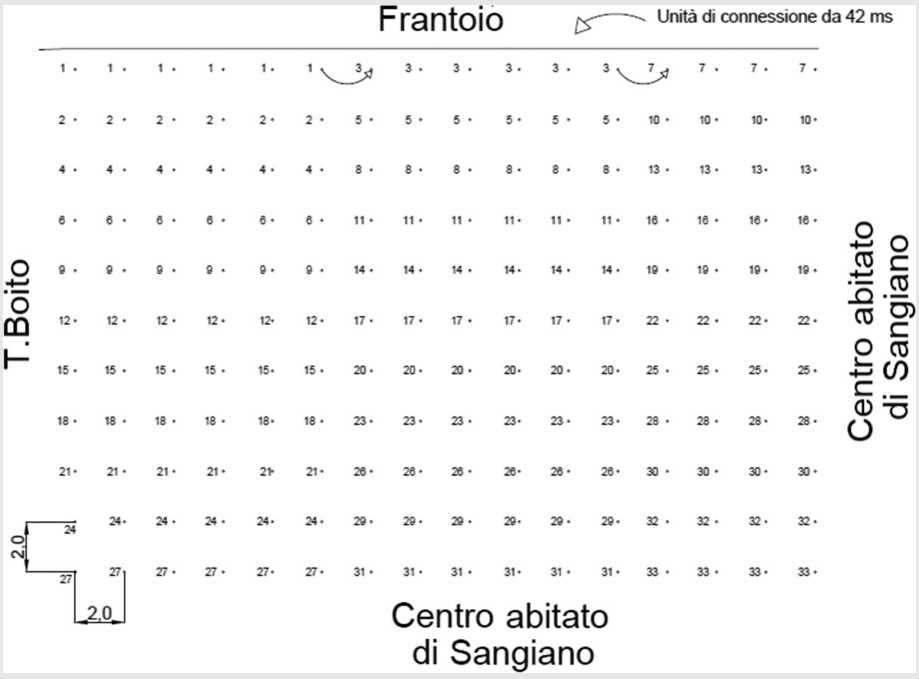
Volata A. La volata è stata realizzata in prossimità del limite SW della concessione in direzione di Caravate, in un punto relativamente vicino all'abitato circostante e distante circa 270 m dalla stazione di misurazione fissa ubicata all'interno del campanile della Chiesa di San G. Battista. Sono stati utilizzati 600 kg di esplosivo Premex 3700 ripartiti in 173 fori. La carica per ritardo è pari a 7 kg, corrispondente al brillamento simultaneo di 2 mine. La temporizzazione delle cariche è quella normalmente adottata. La direzione di propagazione della volata è rappresentata dalle frecce sul piano di tiro. La maglia di tiro è di 2.5 m x 2.7 m, anche se è consuetudine ridurre la spalla tra la prima e la seconda fila di mine. La prima fila di mine solitamente viene aggiunta per compensare la presenza di detrito in posto dovuto ad una non perfetta profilatura dei gradini; sono inoltre presenti una serie di fori aggiuntivi, il cui scopo è quello di favorire la frammentazione.



Volata B. La volata è stata realizzata in una zona centrale della miniera, nella quale sono frequenti inclusioni di argilla, che talora limita l'effetto dell'esplosivo a causa della sua deformabilità. Inoltre, gli strati di marna non sono sub-verticali, ma sub-orizzontali con un valore di calce standard pari a 86, corrispondente a materiale "magro". In passato, in quest'area della miniera, si sono riscontrati problemi nella coltivazione del materiale, che si presentava regolarmente poco frammentato. Proprio per questo motivo si è scelto di incrementare la CPD. Analogamente al caso precedente, la direzione lungo la quale si estende la volata è NE-SW. La superfice è rettangolare con una disposizione di 21 file di mine (7 mine/fila), il che rende molto allungata (circa 50 m) e poco larga (circa 20 m) la volata. L'adozione di questa geometria ha da sempre portato dei benefici, fin dall'apertura della miniera di Sasso Poiano e, pertanto, le volate con geometria rettangolare sono frequentemente utilizzate. Il gradone ha un'altezza di circa 10 m, a causa della presenza di una rampa per il passaggio dei dumper. Si tratta di un dato del tutto inusuale, poiché l'esplosivo ha il compito di smuovere solo la metà del materiale; ciò implica che oltre alle due superfici laterali libere, il piede non è confinato, trovandosi ad un'altezza di 5 m dal suolo. Come si osserva in figura, la disposizione delle mine non è del tutto regolare, a causa dell'irregolarità del ciglio del gradino in coltivazione, su cui ha agito l'escavatore. Può essere quindi necessario realizzare fori aggiuntivi per favorire la frammentazione del materiale, provocando talora una variazione della CPD. Nel caso in esame, la CPD prevista era di 14 kg, corrispondenti al brillamento simultaneo di 4 mine. Il numero totale di fori caricati è pari a 175, su un'area di circa 950 m^2, e un volume di 4580 m^3. Il consumo specifico di esplosivo è risultato pari a 0,13 kg/m^3. La distanza fra la volata e il geofono era di poco superiore a 330 m. I dati raccolti dallo strumento evidenziano valori di picco di 0,635 mm/s con frequenza di 36,5 Hz in direzione verticale e 0,381 mm/s in direzione orizzontale. Il vettore somma risultante è quindi di 0,762 mm/s, nettamente al di sotto dei vincoli imposti dalle norme. La durata totale della volata è di 642 ms. Durante la fase di estrazione con l'escavatore, l'operatore ha evidenziato una maggiore facilità operativa, senza la necessità di forzare il materiale con la benna. La riduzione della dimensione media del passante D50 e D75 conferma quantitativamente le impressioni dell'operatore, evidenziando una migliore efficienza di frammentazione da parte dell'esplosivo.



Volata C. La volata (89 mine) è stata realizzata aumentando ulteriormente la CPD da 14 kg a 21 kg, corrispondenti al brillamento simultaneo di 6 mine, con maglia di tiro pari a 2.7 m x 2.5 m. Le vibrazioni prodotte durante la volata sono state pari a 0.762 mm/s, inferiori al limite di 1 mm/s. La sede della volata era nella parte centrale della miniera, a distanza di circa 320 m dallo strumento di misura. La differenza rispetto alle altre volate è consistita nell'uso di detonatori elettrici in serie per il brillamento della prima fila di mine: ciò si è reso necessario poiché la lunghezza delle unità di connessione non consentiva il collegamento simultaneo di 6 mine. Oltre all'aspetto pratico, l'utilizzo di detonatori elettrici per l'innesco della volata ha permesso di modificare la direzione di propagazione della volata, sfruttando almeno una delle due superfici libere disponibili. L'area della volata copre un'estensione di circa 510 m^2, e il volume di materiale estratto è pari a 2300 m^3; il consumo specifico di esplosivo anche in questo caso è intorno a 0.135 kg/m^3. Durante il sopraluogo effettuato dopo il brillamento, è stata riscontrata la presenza di frammenti di dimensioni relativamente ridotte; ciò ha consentito un ottimo rendimento dell'escavatore.



Volata D *(piano di tiro proposto). Maglia di tiro: 2,0 m x 2,0 m; Fori da mina (n°): 176; Area (m^2): 660; Volume (m^3): 3300; PF (kg/m^3): 0,18; Q totale (kg): 600; CPD (kg): 21. La volata è caratterizzata da 16 file di mine e 12 mine/fila, più che sufficiente ad ottenere dei cumuli di materiale rappresentativi. Il brillamento è stato effettuato mediante sistema Nonel e, poiché si sono adottati detonatori in foro con lunghezza del tubo pari a 18 m, è stato possibile collegare 6 mine da brillare simultaneamente. L'uso di detonatori elettrici collegati in serie come nel caso della volata C sarebbe stato altrettanto valido. Qualora si decidesse di adottare il piano di tiro proposto, sarebbe consigliabile l'acquisto di detonatori elettrici micro-ritardati da collegare in serie, evitando l'acquisto di detonatori con tubo Nonel di lunghezza pari a 18 m.*