

## Abbattimento controllato con esplosivi: la fratturazione indotta oltre il profilo finale di scavo

R. FOLCHI\*

### 1. Meccanismi di fratturazione collegati al brillamento di una carica confinata in mezzi lapidei

#### Premesse

Quando una carica esplosiva detona in uno spazio confinato si ha lo sviluppo di una enorme potenza associata prevalentemente alla produzione di gas ad elevatissima pressione e temperatura [BAKER, 1983; LANGFORS, 1978]. Il mezzo circostante, così sollecitato, si frattura e, spinto dai gas, collassa.

L'innesco delle fratture è determinato dai seguenti fattori [HAGAN, 1981; DOWDING, 1985; JOHANSSON, 1970; ROSSMANITH 1981; HARRIER, 1981; A.I.M.M.P.I., 1968; FOLCHI 1987]: 1. sollecitazioni impulsive (shock waves) al contorno del foro per l'espansione dei gas d'esplosione; 2. riflessione dell'onda elastica (stress waves) di compressione sulle superfici di contatto con mezzi a minore impedenza acustica; 3. espansione dei gas di esplosione nelle fratture preesistenti o in quelle di neoformazione; 4. gradiente di trazione associato alla propagazione dell'onda elastica lungo la superficie di separazione tra due mezzi a differenti caratteristiche elastiche.

#### 1.1 Sollecitazioni impulsive al contorno del foro (micronizzazione e fratturazione radiale).

La roccia nell'immediato intorno del foro, raggiunta dall'onda impulsiva prodotta dall'esplosione, è sottoposta ad elevatissime sollecitazioni radiali e tangenziali che ne provocano l'immediata micronizzazione (Fig. 1C). L'estensione della fascia micronizzata varia al variare del rapporto tra impedenza acustica dell'esplosivo e del mezzo circostante, dal rapporto tra volume della camera di scoppio e volume

occupato dall'esplosivo (disaccoppiamento esplosivo-roccia), dal valore del picco di sovrappressione dei gas, ecc..

A maggiore distanza, e fino al punto in cui le sollecitazioni superano i valori di resistenza dinamica, la roccia continua a fratturarsi. Si viene, così, a formare una fratturazione radiale che termina in maniera piuttosto netta quando, per effetto dell'attenuazione, le sollecitazioni si riducono al di sotto dei valori di resistenza dinamica del materiale (Fig. 1B). Qualche frattura si può estendere oltre, concatenandosi a fratture preesistenti (Fig. 1D).

L'intensità, l'estensione e la geometria della fratturazione indotta nel mezzo lapideo dipendono essenzialmente dalle caratteristiche dell'esplosivo, dalla geometria e dalle dimensioni della carica, dal disaccoppiamento esplosivo-roccia e dalle caratteristiche geomeccaniche e morfologiche dell'ammasso roccioso.

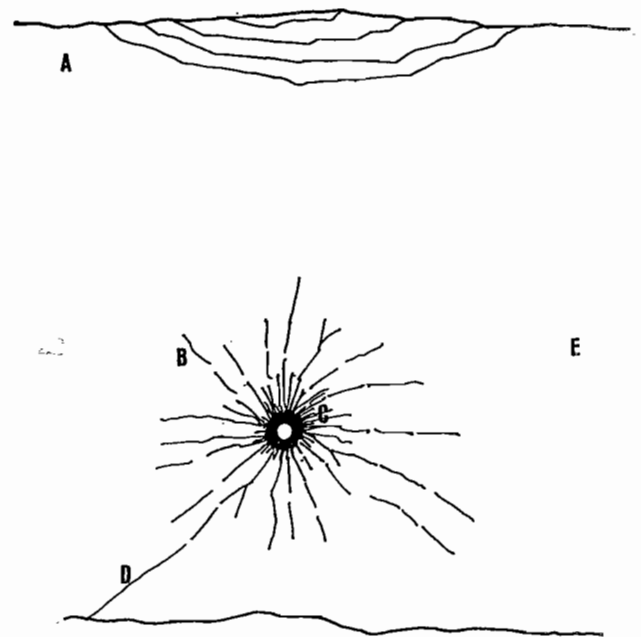


Fig. 1 - Fratturazione della roccia indotta dalla detonazione di una carica esplosiva in un foro da mina [HAGAN, 1981].

\* Dott. Ing. Roberto Folchi, Consulente.  
STF Ingegneria degli Esplosivi, Roma.

L'estensione della fratturazione radiale è legata al diametro del foro da mina da una legge lineare ed alla carica specifica d'abbattimento, così come al disaccoppiamento, da una legge esponenziale (Figg. 2, 3, e 4).

1.2 Riflessione dell'onda elastica di compressione sulle superfici di contatto con mezzi a minore impedenza acustica ('spalling' scagliamento per trazione)

Quando l'onda di compressione interseca un mezzo la cui impedenza acustica Z (prodotto della densità per il modulo di elasticità) è molto minore di quello del mezzo di provenienza (ad esempio l'a-

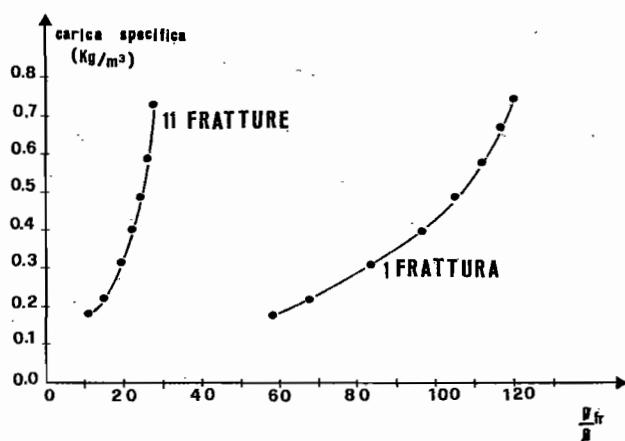


Fig. 2 - Estensione della fratturazione radiale «fr», scalata rispetto al diametro di perforazione, in funzione della carica specifica (Dinamite) per abbattimento di roccia di non buone caratteristiche meccaniche [HARRIER, 1981].

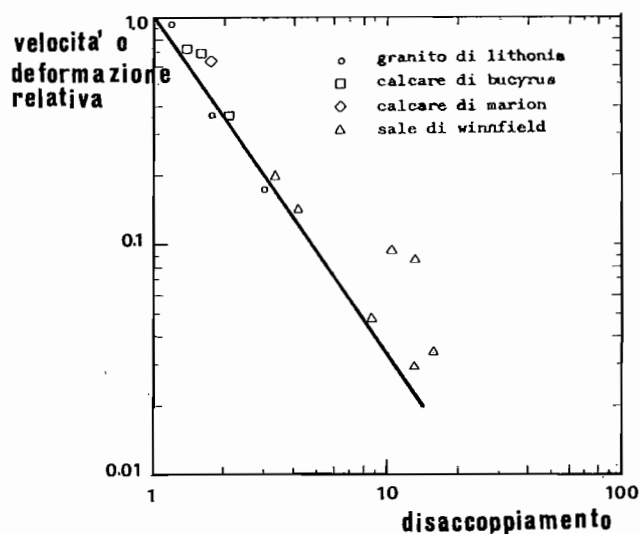


Fig. 3 - Ampiezza della velocità delle particelle (o della deformazione relativa) in funzione del disaccoppiamento roccia esplosivo ovvero del rapporto tra volume della camera di scoppio e volume occupato dall'esplosivo [A.I.M.M.P.I., 1968].

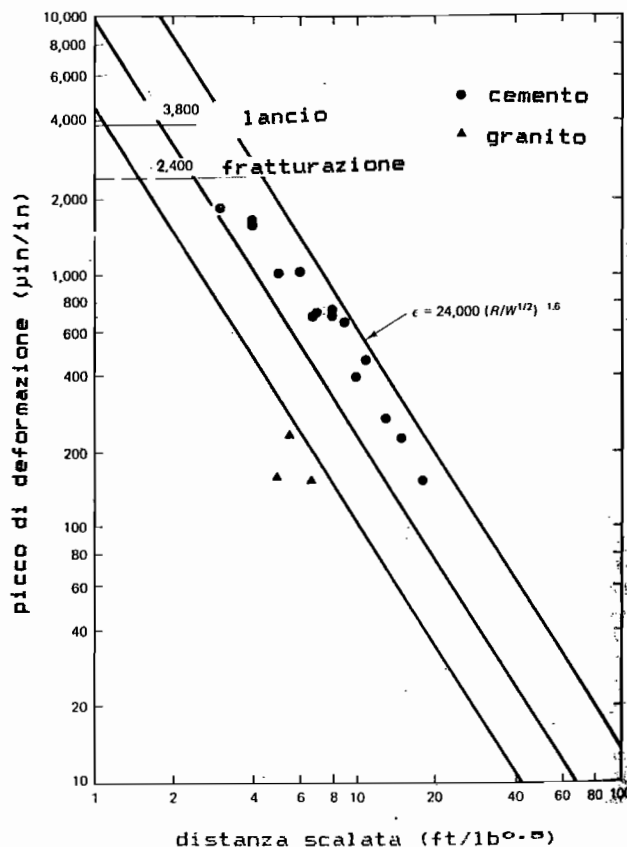


Fig.4 - Deformazione indotta nel granito e nel calcestruzzo al variare della distanza dal punto di brillamento e della quantità di carica esplosiva. Valori limite per la fratturazione [DOWDING, 1985]

ria in una superficie libera oppure una frattura riempita di argilla, ecc.), questa si riflette come onda di trazione.

L'ampiezza dell'onda riflessa di trazione può superare i valori di resistenza dinamica del mezzo determinando l'innesco di processi fessurativi in porzioni di roccia anche distanti dal foro (Fig. 1A e 1D).

1.3. Espansione dei gas di esplosione (allungamento delle fratture preesistenti o di neoformazione)

Dopo aver prodotto le fratture radiali i gas in espansione penetrano nelle fratture di neoformazione ed in quelle preesistenti che intersecavano il foro (o messe in comunicazione con esso dalle nuove), provocandone l'estensione.

La concentrazione degli sforzi al vertice della frattura per effetto dei gas (e quindi l'entità dell'estensione indotta) è tanto maggiore quanto maggiore è la sua ampiezza areale. In presenza di fratture di una certa estensione questo fenomeno può assumere una non trascurabile rilevanza, andando ad interessare porzioni di roccia ben oltre il profilo finale di scavo.

Questo fenomeno si riduce d'importanza dall'alto verso il basso degli scavi verticali, in conseguenza al crescente serraggio delle fratture e dei giunti di stratificazione per il carico litostatico.

#### 1.4 Gradiente di trazione tra due mezzi a differenti caratteristiche elastiche

Quando l'onda elastica si propaga in un ammasso con una marcata disomogeneità di caratteristiche meccaniche (in particolare del modulo di elasticità e della velocità di propagazione delle onde di compressione), si generano, lungo i piani di separazione tra i mezzi a differenti caratteristiche, elevati gradienti di deformazione.

Il differenziale di deformazione determina sollecitazioni di trazioni che possono superare i valori di resistenza del mezzo innescando fratture (Fig. 5).

Questo fenomeno può assumere importanza anche a considerevoli distanze dal punto di sparo.

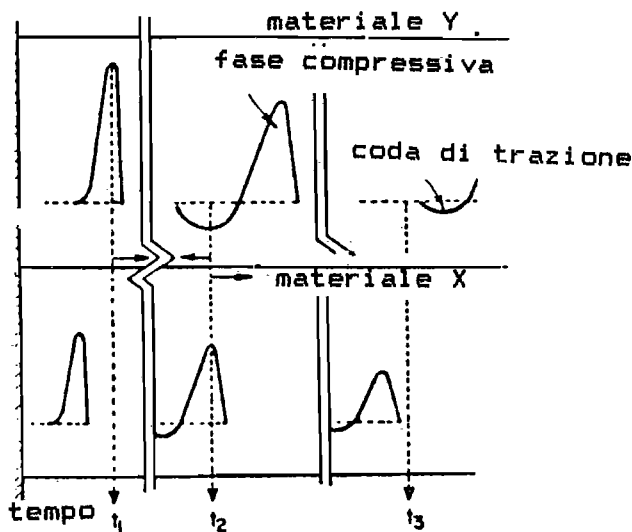


Fig. 5 - Frattura di trazione determinata dal gradiente di deformazione associato al passaggio di un transiente sismico lungo il piano di separazione tra due mezzi a differenti caratteristiche elastiche: modulo di elasticità, velocità di propagazione delle onde di compressione, ecc., [HAGAN, 1981].

## 2. Il controllo della fratturazione indotta oltre il profilo finale di scavo

### 2.1 Generalità

Per il contenimento della fratturazione indotta oltre il profilo finale di scavo è generalmente necessario intervenire, sia in fase di progettazione che di realizzazione dell'abbattimento, su: 1. carica specifica d'abbattimento; 2. diametri di perforazione dei fori

da mina; 3. disaccoppiamento della carica esplosiva nei fori in prossimità del profilo finale di scavo; 4. schema di volata; 5. osservazione delle condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso in fase di perforazione e di caricamento della volata; 6. precisione della perforazione dei fori da mina.

### 2.2. Carica specifica d'abbattimento

L'estensione della fratturazione indotta aumenta esponenzialmente all'aumentare della carica specifica d'abbattimento.

Per le porzioni di roccia da abbattere prossime al profilo finale di scavo diviene, pertanto, opportuna la riduzione della carica specifica sino a quella limite per il particolare tipo di volata e di ammasso roccioso ( $0.15 \div 0.3 \text{ Kg/m}^3$ ).

### 2.3 Diametri di perforazione dei fori da mina

L'interasse  $E$  (distanza tra i fori lungo una fila) e la spalla d'abbattimento  $V$  (distanza tra il foro, o la fila di fori, e la superficie libera) sono direttamente proporzionali al diametro di perforazione. Più piccolo è il diametro, maggiore è il numero di fori necessari, a parità di volume di roccia da abbattere, carica specifica, ecc..

L'adozione di un piccolo diametro di perforazione consente, pertanto, la distribuzione dell'esplosivo in un maggior numero di fori.

I problemi causati da deviazioni del foro maggiori del previsto o dall'accumulo di carica in cavità non rilevate in fase di perforazione, sono così ridotti in quanto determinati da cariche più piccole.

### 2.4 Disaccoppiamento della carica nei fori in prossimità del profilo finale d'abbattimento

All'aumentare del disaccoppiamento esplosivo-roccia si riduce l'intensità del picco di pressione indotto nell'ammasso e, generalmente, l'estensione della fratturazione.

La carica specifica d'abbattimento dei fori di profilatura e, in generale, di quelli prossimi al profilo di scavo, deve pertanto essere ottenuta distribuendo l'esplosivo in un numero di fori maggiore di quello necessario con un addensamento ordinario della carica.

I fori di profilatura devono essere perforati con piccolo interasse e caricati meno dei fori d'abbattimento (tecnica del *presplitting*, dello *smooth blasting*, del *cautious blasting*, ecc.).

Talvolta questi, perforati con interasse pari a  $15 \div 30$ , cm sono tenuti completamente scarichi, a formare una sorta di superficie riflettente per l'onda impulsiva indotta dalla volata (tecnica del *line drilling*, ecc.).

### 2.5 Schema di volata (rapporto interasse/spalla d'abbattimento)

Per dar maggior sfogo ai gas d'esplosione, e ridurre così l'azione di prolungamento delle fratture preesistenti e di quelle di neoformazione oltre il profilo di scavo, è opportuno adottare uno schema di volata in cui il rapporto tra interasse e spalla dei fori d'abbattimento sia maggiore di 1 (generalmente  $V/E$  viene adottato pari a 1.25).

### 2.6 Osservazione delle caratteristiche geotecniche dell'ammasso roccioso in fase di perforazione e di caricamento della volata.

Una fondamentale importanza assume l'osservazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso ed in particolare del suo stato fessurativo.

L'operatore alla perforazione deve annotare la presenza d'intercalari di roccia cataclasata o alterata. In questi livelli potrebbe crearsi, in seguito al locale franamento del foro, uno slargo della camera di scoppio nel quale si andrebbe ad accumulare l'esplosivo. L'addetto al caricamento, da parte sua, deve controllare che il quantitativo di esplosivo introdotto nel foro non sia superiore a quello previsto.

Nell'intersezione di fratture beanti di considerevoli dimensioni, in presenza di cavità o di intersezione con banchi di riccia con scadenti caratteristiche meccaniche, il segmento di foro deve essere riempito con materiale sterile e la continuità della carica, nei segmenti di foro a cavallo, dovrà essere assicurata da miccia detonante o da doppio innesco con detonatore.

### 2.7. Precisione della perforazione dei fori da mina

La precisione del foro è collegata ad una serie di fattori che determinano [FOLCHI, 1988]: 1. un errore nella ubicazione del punto di intestazione; 2. un errore nella inclinazione della batteria di aste di perforazione; 3. un errore nella traiettoria dello scalpello.

I risultati ottenibili con la adozione di opportuni accorgimenti possono portare ad un errore medio di

deviazione non superiore al  $2 \div 3\%$ , senza pesare sulla efficienza globale della perforazione.

La spalla d'abbattimento deve quindi essere posta minore di quella teorica massima  $V_{max}$  di una quantità pari al possibile errore di perforazione  $F$ . In tal modo la distanza reale dalla superficie libera non supera quella massima teorica e non si corrono rischi di 'mancato abbattimento' con conseguente intensa fratturazione oltre il profilo finale di scavo (Fig. 6).

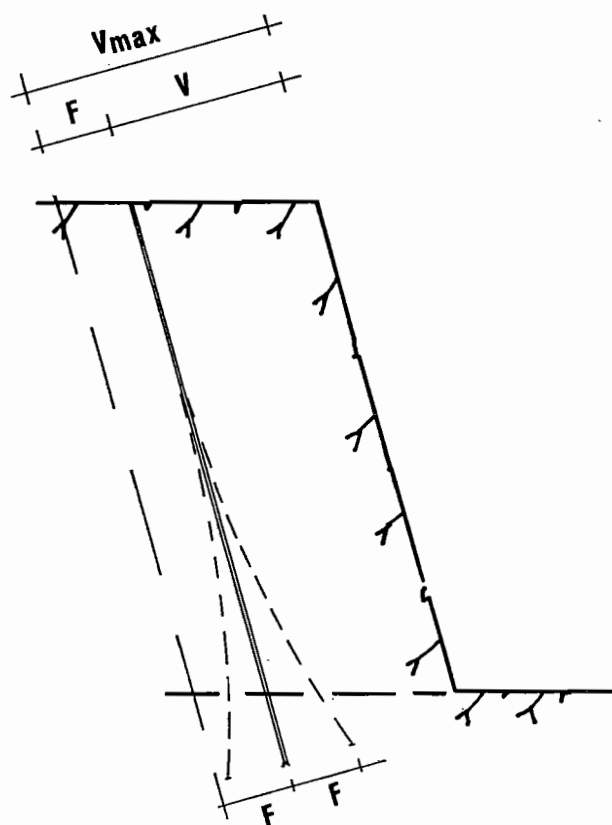


Fig. 6 - Schema di perforazione di un foro da mina in abbattimento a gradone. La distanza di perforazione del foro dalla superficie libera  $V$  deve essere pari alla massima distanza ammissibile  $V_{max}$  meno il possibile errore di perforazione  $F$  [LANGFORS, 1978].

Una perforazione precisa, oltre tutto, consente di ridurre la carica specifica d'abbattimento (il sovradimensionamento della carica è infatti proporzionale al quadrato dell'errore di perforazione).

### BIBLIOGRAFIA

- A.I.M.M.P.E. (1968) - *Surface Mining*. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineering Inc., N.Y.  
 BAKER W. E. et al. (1983) - *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.  
 DOWDING C. H. (1985) - *Blast vibration monitoring and control*. Prentice Hall, INC., Englewood Cliff, NJ.

- FOLCHI R. *et al.* (1988) - *Precisione nella perforazione a rotopercolazione*. L'Industria Mineraria, n.6, Roma.
- FOLCHI R. (1987) - *Dispositivo pneumatico per la misura di parametri di resistenza di campioni di roccia sottoposti a carico dinamico*. Oleodinamica Pneumatica, Milano, n. 7.
- HAGAN T. N., MORRIS P. (1981) - *The mechanics and measurement of blast induced fracturing in pit-wall weak rock*. Int. Symp. on Weak Rock, Tokyo.
- HARRIER G. (1981) - *Blasting to achieve slope stability in weak rock*. Third Int. Conference on Stability in Surface Mining, Vancouver.
- JOHANSSON C. H., PERSSON P. A. (1970) - *Detonics of High Explosives*. Academic Press, London & New York.
- LANGFORS U., KIHSTROM B. (1978) - *The modern technique of rock blasting*. John Wiley & Sons, London.
- LUNDBORG N. (1981) - *The probability of fly rock*. Sve. De. Fo. report DS 1981.5, Stockholm.
- ROSSMANTH H.P. (1981) - *Dynamic crack analysis and interaction between crack and waves*. Symp, on crack propagation, C.I.S.M. Udine.