



ISTITUTO ASCANIO SOBRERO  
per la Ricerca sugli Esplosivi e la Detonica

# **EXPLO 2010**

*Esplosivi civili, Pirotecnia, Esplosivi militari*

**GIORNATA IN RICORDO  
di**

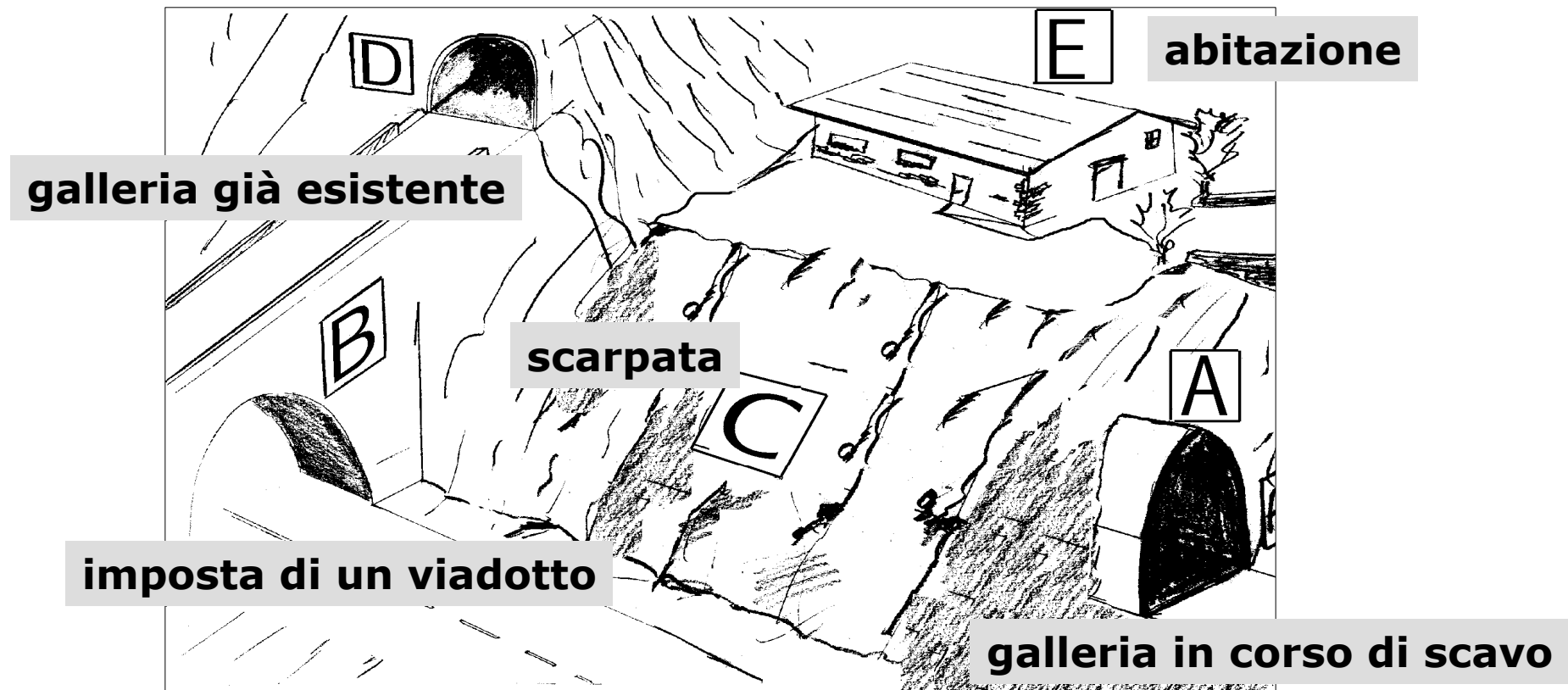
**PIETRO BALLESTRAZZI ED ENZO MARIA DANTINI**

**22 Ottobre 2010**

**Vibrazioni indotte dall'abbattimento con esplosivi.  
Analisi di casi studio ed esempi di monitoraggio,  
alla luce della normativa vigente**

**Marilena Cardu** – *DITAG Politecnico di Torino; IGAG CNR; Torino*

A dispetto dei numerosi criteri di valutazione del danno causato dalle vibrazioni, è talora difficile isolare completamente il danno dovuto a vibrazioni rispetto a quello causato dall'assestamento/cedimento di edifici, costruzioni inadeguate, età, ecc. Il problema critico rimane l'eliminare, o ridurre considerevolmente, le lamentele causate dalle vibrazioni, rispettando i limiti imposti dalle normative.



Vibrazioni; proiezioni; instabilità di versanti; rumore....

Il tipo di roccia o terreno in cui si deve eseguire un lavoro di scavo condiziona pesantemente la velocità di propagazione delle vibrazioni.

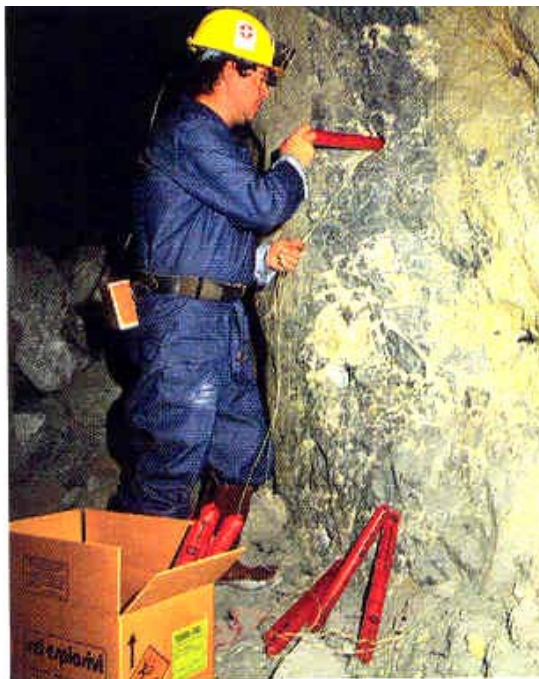
<b>Material</b>	<b>Velocity of elastic waves (m/s)</b>	
	<b>S waves</b>	<b>P waves</b>
Clay or silt (dry)	- 200	400 – 600
Clay or silt (wet)	- 200	1300 – 1600
Sand or gravel (dry)	200 – 400	400 – 700
Sand or gravel (wet)	200 – 200	1400 – 1700
Moraine (dry)	200 – 700	700 – 1500
Moraine (wet)	200 – 700	1400 – 2000
Broken rock	800 – 1200	1900 – 2500
Sandstone or schist	1200 – 1600	2500 – 3400
Granite or gneiss	2000 – 2500	4000 – 4800



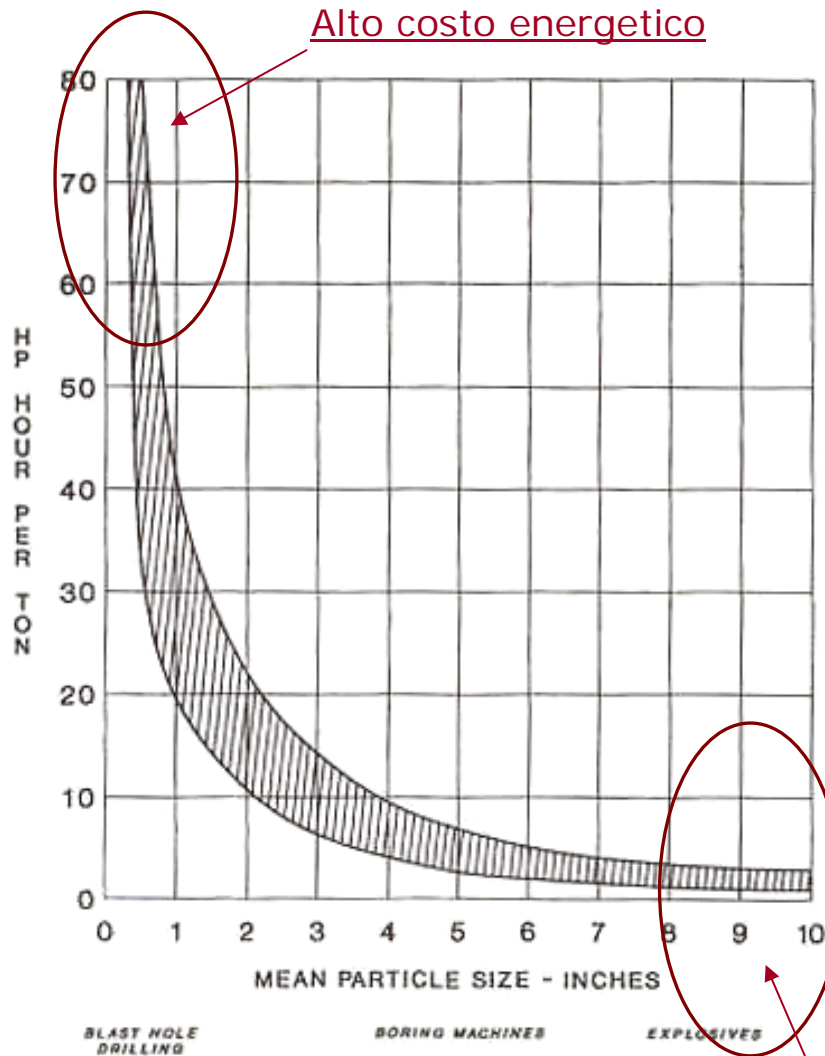
Lo scavo implica l'applicazione di forze notevoli a porzioni di roccia in continuità meccanica più o meno perfetta con l'ammasso, mediante utensili metallici o gassosi (esplosivo) che le distacchino. Tali forze danno luogo a sollecitazioni, e quindi deformazioni, non confinabili nel solo volume che s'intende abbattere. **Le forze possono essere applicate con gradualità (es. macchina fresatrice) o impulsivamente (es. esplosivo).**

Il rilascio all'atto del distacco ha sempre carattere impulsivo e, quindi, la roccia adiacente al volume distaccato è allontanata dalla posizione di riposo e lasciata bruscamente libera di tornare ad essa.

C'è però una notevole differenza tra le entità del disturbo "sismico" prodotto dai diversi metodi di scavo.



Naturalmente, il **disturbo vibrazionale** causato da macchine di scavo continue ha carattere continuo e, durante il turno, si interrompe solo in corrispondenza delle interruzioni del lavoro di scavo per riposizionamenti, manutenzione, ecc.



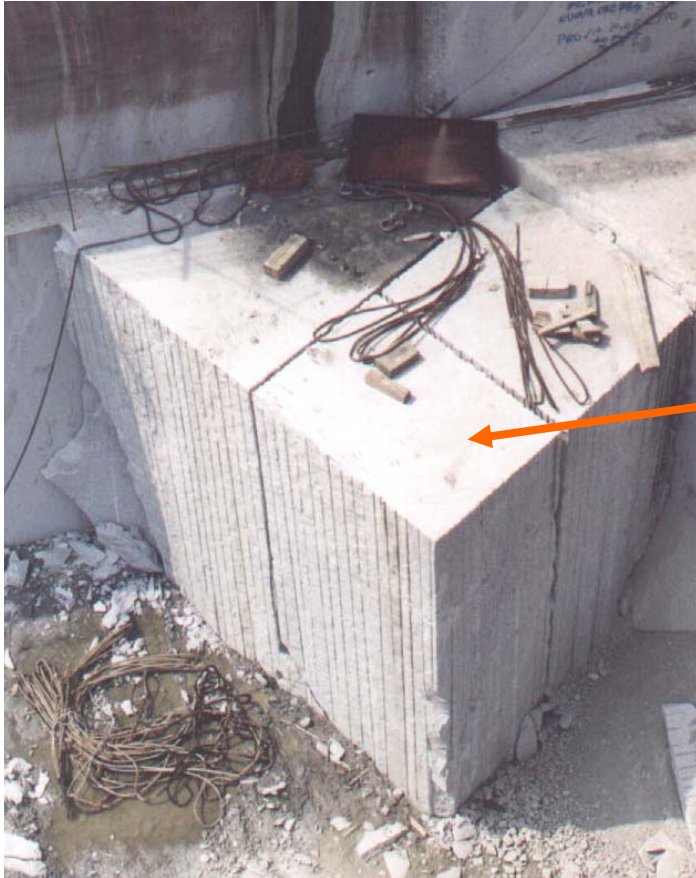
Alto costo energetico

**In sintesi, il disturbo da vibrazioni nello scavo in roccia si correla in modo diretto con le dimensioni dei frammenti ottenuti dallo scavo e, purtroppo, in modo inverso con il costo energetico unitario di scavo, che decresce al crescere delle dimensioni degli elementi distaccati.**

Correlazione tra il **consumo specifico di energia** nello scavo in roccia (asse verticale) e le **dimensioni dei frammenti prodotti** (asse orizzontale). La parte a sinistra copre il campo della frammentazione fine (perforazione), quella intermedia della frammentazione media (scavo meccanico) e quella a destra della frammentazione grossolana (abbattimento con esplosivi).

Alto disturbo vibratorio

## Propagazione a distanza dalla sorgente



Le vibrazioni si propagano a distanza dal punto in cui hanno origine, a meno che non sia esclusa ogni continuità meccanica tra il volume in cui si svolge lo scavo ed il mezzo circostante

Il volume rappresentato in figura è separato dal massiccio con tagli verticali su tutti i lati, ma il contatto è ancora assicurato attraverso la base.

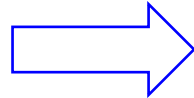
La presenza, tuttavia, di discontinuità lungo la congiungente della sorgente col punto di rilevamento rende più rapida l'attenuazione del fenomeno con la distanza rispetto alla propagazione in roccia integra.





## Propagazione a distanza dalla sorgente

$$v = K \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha$$

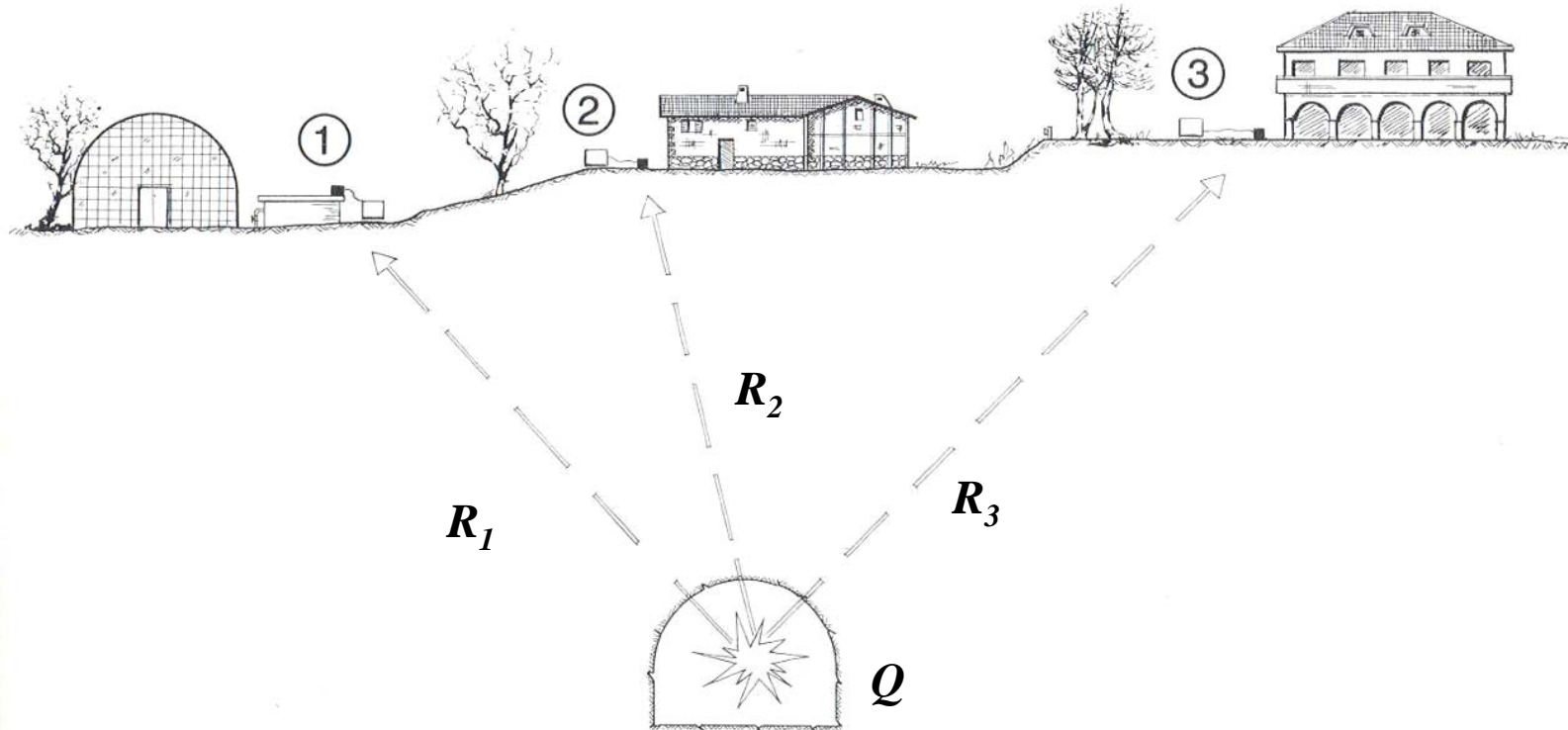


$v$  = velocità particellare di picco, mm/s

$Q$  = carica, o carica per ritardo, kg

$R$  = distanza, m

$K, \alpha$  = costanti di sito, da determinare sperimentalmente



## Leggi di sito di uso comune

USBM (1959)

$$v = K \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-B}$$

Langefors-Kihlström (1958)

$$v = K \cdot \left( \sqrt{\frac{Q_{\max}}{R^{3/2}}} \right)^B$$

Davies et al. (1964)

$$v = K \cdot R^{-B} \cdot Q_{\max}^A$$

Ghosh-Daemen (1983)

$$v = K \cdot \left( \frac{R}{Q_{\max}^{1/3}} \right)^{-B} \cdot e^{-\alpha R}$$

Ambraseys-Hendron (1968)

$$v = K \cdot \left( \frac{R}{Q_{\max}^{1/3}} \right)^{-B}$$

Indian Standard Institution (1973)

$$v = K \cdot \left( \frac{Q_{\max}}{R^{2/3}} \right)^B$$

Ghosh-Daemen (1983)

$$v = K \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-B} \cdot e^{-\alpha R}$$

CMRI (Pal Roy et al., 1993)

$$v = n + K \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-1}$$

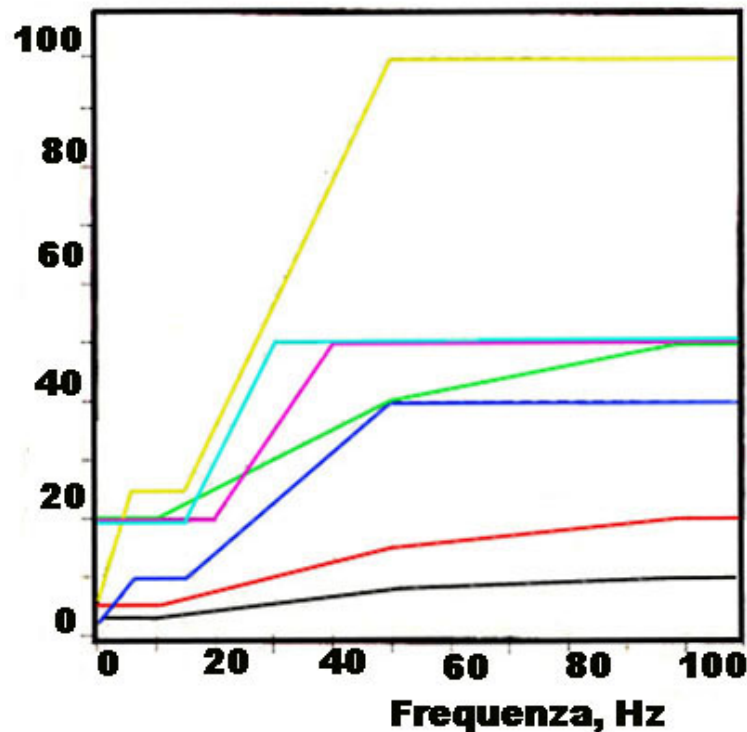
**L'efficacia predittiva delle 8 leggi** è stata analizzata e confrontata in svariati casi reali. La conclusione è pessimistica perché non solo, come atteso, **le predizioni divergono tra loro**, ma è anche impossibile stimare quale tipo di legge risulti in ogni caso più o meno prudentiale nel decidere i limiti di carica da rispettare.



## Vibrazioni - Controllo

Al valore massimo di velocità (*ppv*) è riconosciuto da molte norme il ruolo di indicatore principale della nocività della vibrazione.

**Velocità, mm/s**



- A** DIN 4150 - Edifici delicati
- B** DIN 4150 - Edifici residenziali
- C** DIN 4150 - Edifici industriali
- D** GFEE 1 - Edifici sensibili
- G** OSMRE
- F** USBM RI8507
- E** GFEE 2 - Edifici resistenti

Esempi di definizione dei limiti d'intensità di vibrazione ammessi dalle normative di diversi Paesi. Si noti la rilevante disparità. Le curve A, B, C sono spesso prese a riferimento anche in Italia.

# Vibrazioni - Controllo

## DIN 4150-3

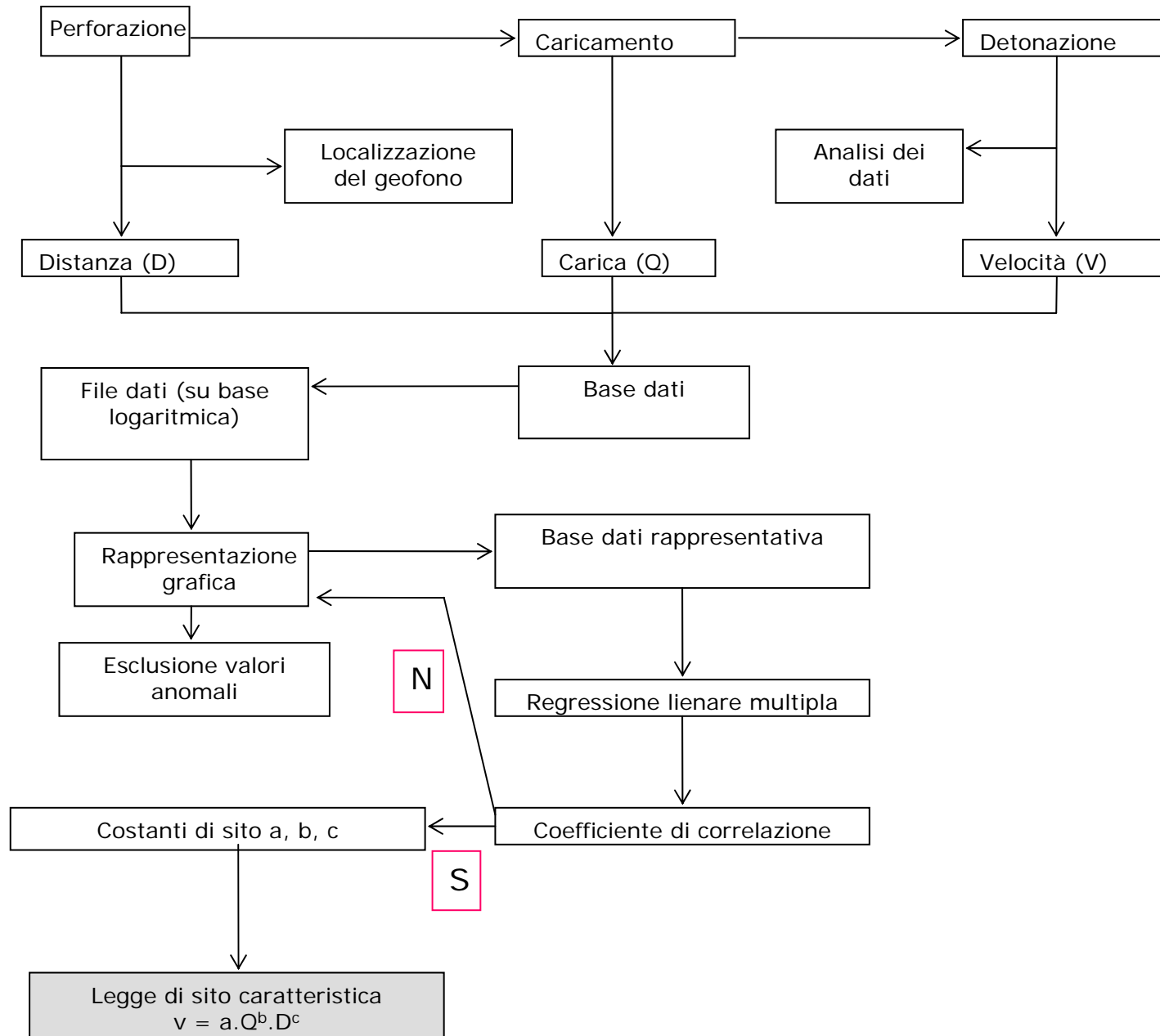
Classe	Tipo di edificio	Valori di riferimento per velocità di oscillazione (ppv)			
		Frequenze alle fondazioni			Ultimo solaio orizzontale
		da 1 a 10 [Hz]	da 10 a 50 [Hz]	da 50 a 100 [Hz] *	tutte le frequenze
1	Costruzioni per attività commerciali, costruzioni industriali e costruzioni con strutture simili per struttura e utilizzo	20	da 20 a 40	da 40 a 50	40
2	Edifici abitativi o edifici simili per costruzione e/o utilizzo	5	da 5 a 15	da 15 a 20	15
3	Edifici che per la loro particolare sensibilità alle vibrazioni non rientrano nelle precedenti classificazioni e che sono da tutelare in modo particolare (per esempio monumenti storici)	3	da 3 a 8	da 8 a 10	8

\* per frequenze superiori a 100 [Hz] possono essere adottati come minimo i valori per 100 [Hz]

## Limiti di vibrazione adottati da altri paesi (Piyush Pal Roy, 2005)

Measure	Units	Comments
Human perception	0.15 - 1.5 mm/s	
Visible damage	50 mm/s	Values in excess cause appreciable structural damage
British Standard BS 64722.1992	8.5 - 12.7 mm/s	90 per cent confidence limit – permissible impulsive vibration at residential property
Leicestershire County Council (UK)	6 mm/s	95 per cent confidence level – part of conditions covering blasting within modern planning permissions
Australian Standard Explosives Code (AS2187-1993)	5 mm/s	Common environmental limit (EPA) – depends on administering authority
Australian Standard Explosives Code (AS2187.2-2006)	2 mm/s	Historical buildings and monuments – displacement for frequencies less than 15 Hz
	10 mm/s	Houses and low rise residential buildings – resultant PPV for frequencies greater than 15 Hz
	25 mm/s	Commercial limit AS 2187.3
India	5 mm/s	Domestic houses/structures – frequencies less than 8 Hz
German Standard DIN 4150	5 mm/s	Domestic houses/structures – frequencies less than 10 Hz
	5 - 15 mm/s	Domestic houses/structures – frequencies 20 to 40 Hz
	15 - 20 mm/s	Domestic houses/structures – frequencies 50 to 100 Hz
Hungarian Standard	5 mm/	Panel houses
Swiss Standard	8 - 12 mm/s	Objects of historic interest or other sensitive structure – frequency bandwidth: 60 - 90 Hz
Swedish Standard National Museums	5 mm/s	Sensitive exhibits
	25 mm/s	Building structure

# Vibrazioni - Controllo



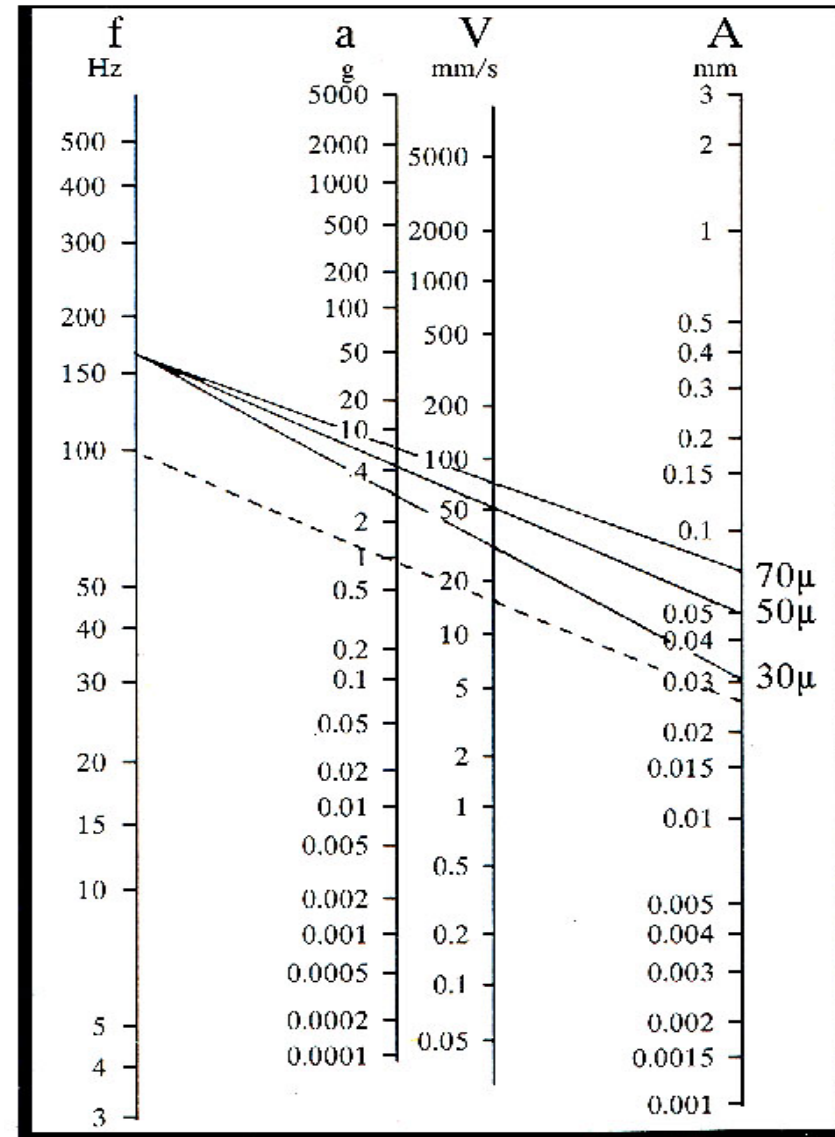


## Vibrazioni - Controllo

Per scopi pratici, si può ricorrere anche a valutazioni speditive.

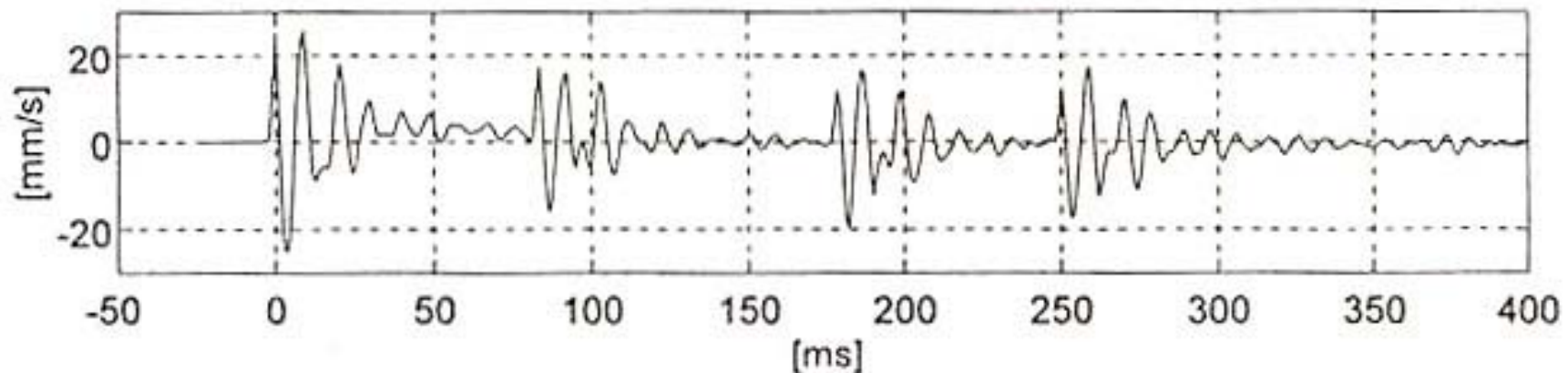
Se 2 valori sono noti, gli altri 2 possono essere calcolati ricorrendo a nomogrammi.

Nomogramma per determinare la relazione fra frequenza ( $f$ ), accelerazione ( $a$ ), velocità di oscillazione ( $v$ ) e ampiezza ( $A$ ).



## Vibrazioni: esempio

Vibrogramma, registrato a **30 m dalla fronte**, dell'esplosione delle **4 mine d'apertura** di una volata a fori paralleli per una galleria di piccola sezione. Si noti la sensibilmente maggiore velocità in corrispondenza della 1<sup>a</sup> mina, benché la carica fosse la stessa per tutte (**2.5 kg di dinamite**); funzionamento perfettamente regolare.



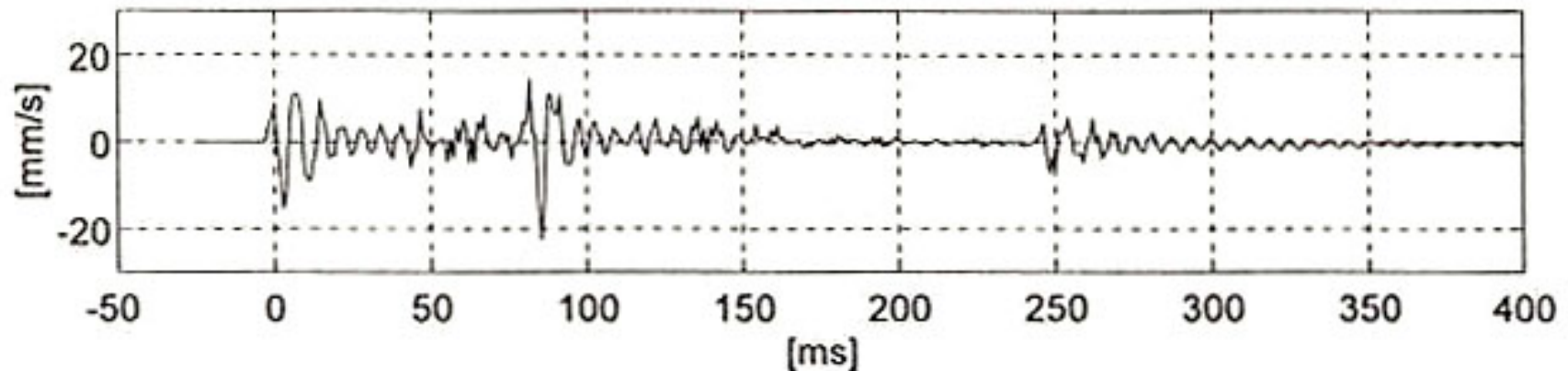
In rilevamenti eseguiti a breve distanza è possibile notare la differenza tra l'effetto della prima mina, la cui superficie libera è rappresentata dal solo foro scarico, e quello delle successive mine di apertura.

## Flash-over: esplosione per simpatia

E' un'impresione delle temporizzazioni che **ha sempre conseguenze negative**. Consiste nell'esplosione di una carica per effetto di quella di una carica vicina, anziché per azione del suo detonatore.

Fenomeno abbastanza comune nelle aperture delle volate canadesi in galleria.

**La carica per ritardo è maggiorata della  $Q_{expl}$ . contenuta nella mina indebitamente esplosa fuori tempo**



Vibrogramma dell'esplosione delle 4 mine d'apertura di una volata a fori paralleli. Si notino la mancanza del segnale della 3<sup>a</sup> mina e l'ampiezza anomala del segnale della 2<sup>a</sup>: la 3<sup>a</sup> mina è esplosa per simpatia (flash over) con la 2<sup>a</sup>.

## BDI – Blast Damage Indicator

Blast Damage Indicator



permette di prevedere eventuali danni all'ammasso roccioso dovuti all'utilizzo di cariche esplosive

Si può considerare come analogo del reciproco di un fattore di sicurezza, e vale:

$$BDI = \frac{\text{sollecitazioni indotte}}{\text{resistenza a trazione della roccia}}$$

Dove:

$$\text{sollecitazioni indotte} = ppv \left( \frac{m}{s} \right) \times \rho \left( \frac{kg}{m^3} \right) \times c \left( \frac{m}{s} \right)$$

$$\text{resistenza a trazione} = T_d (MPa) \times K_s (ad) \times 10^6$$

Con:

- ppv = velocità particellare di picco (mm/s)
- $\rho$  = massa volumica della roccia (kg/m<sup>3</sup>)
- c = velocità onde P (m/s)
- $T_d$  = resistenza a trazione dinamica (MPa)
- $K_s$  = costante di qualità del sito (ad)

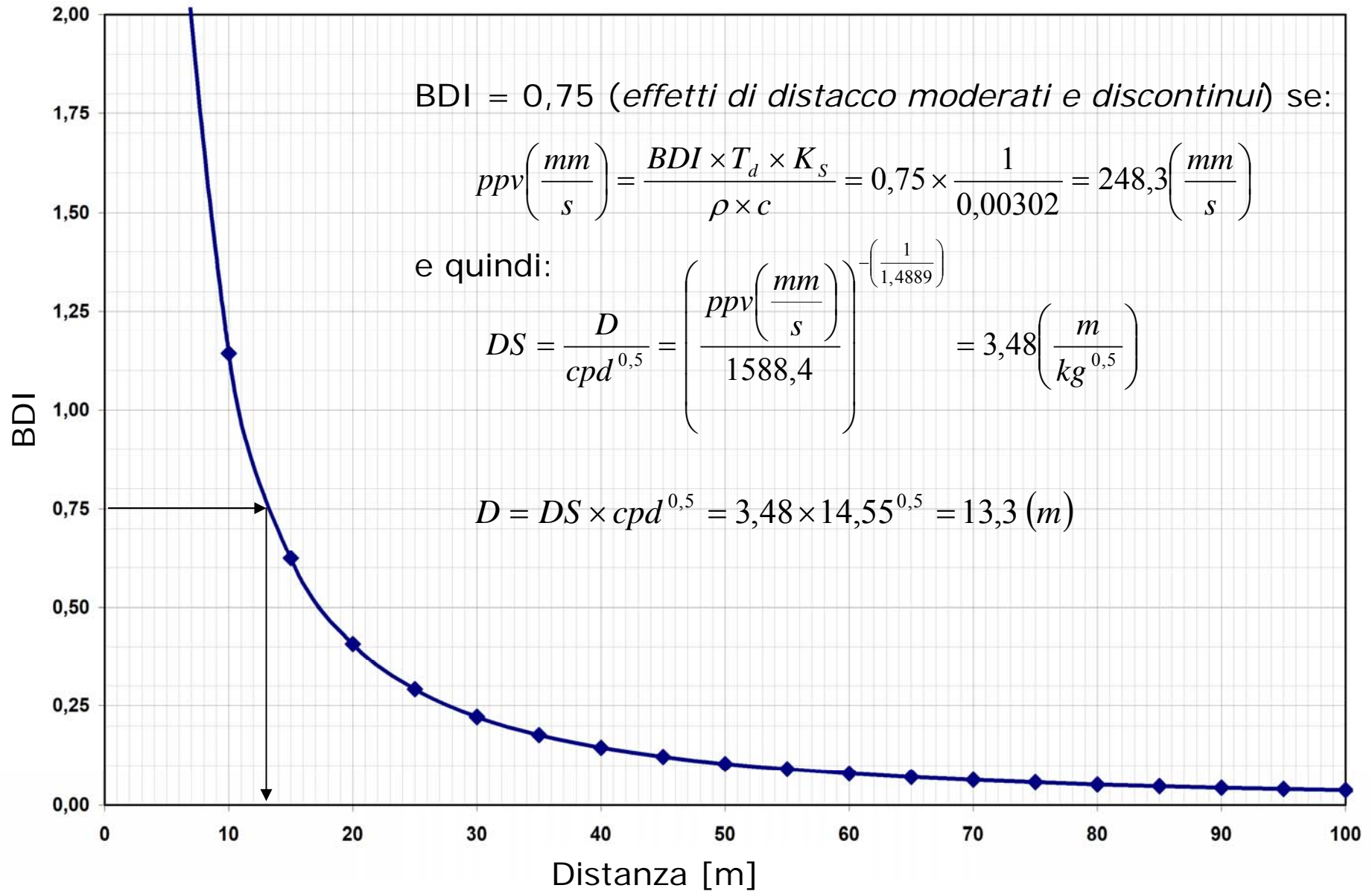


## BDI – Blast Damage Indicator

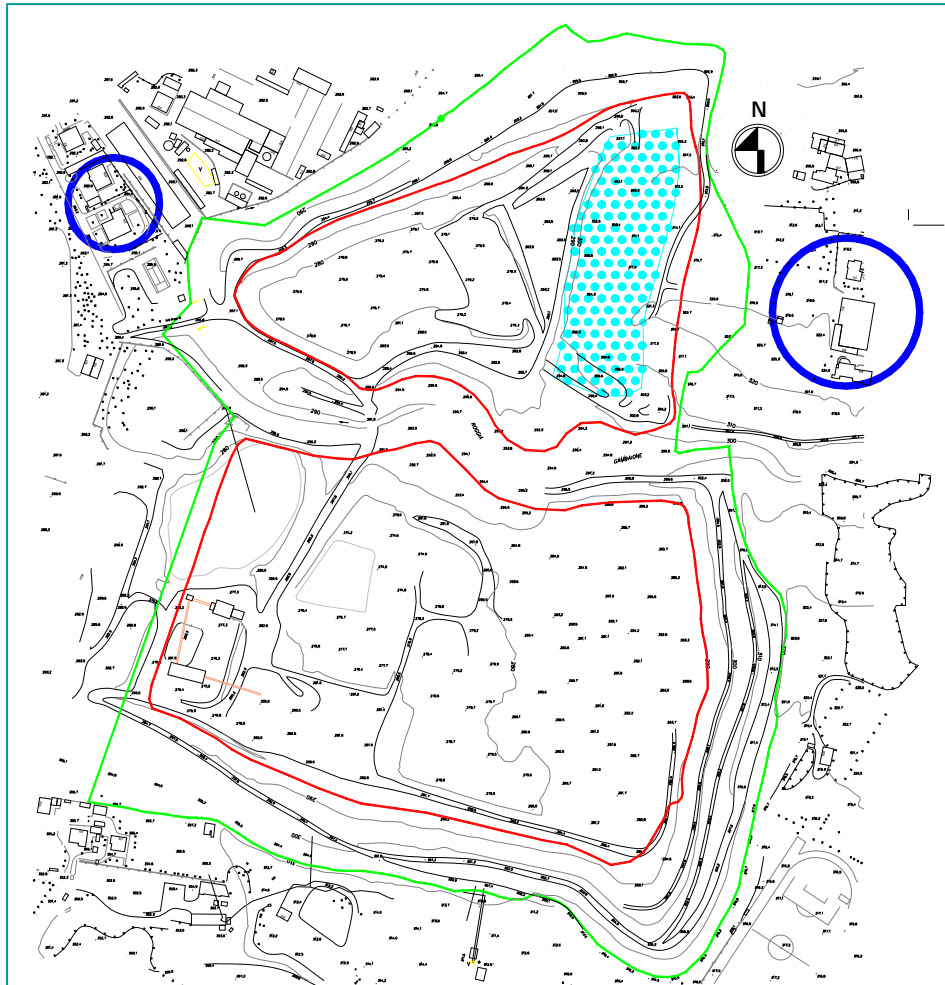
BDI	Tipo di danno
$\leq 0,125$	Nessun danno alle strutture
0,25	Nessun danno visibile
0,50	Effetti minori di distacco di scaglie (scabbing), non molto estesi
0,75	Effetti di distacco moderati e discontinui
1,00	Grandi effetti di scabbing, estesi alla maggior parte delle pareti
1,50	Danneggiamento grave alla totalità di superfici libere
$\geq 2,00$	Crolli estesi alla totalità dei vuoti di risulta

$$BDI = \frac{\rho \times c \times ppv}{T_d \times K_s \times 10^6} = \frac{2200 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \times 2500 \left( \frac{m}{s} \right)}{3,5(MPa) \times 0,52 \times 10^6} \times ppv \left( \frac{m}{s} \right) = 3,02 \left( \frac{s}{m} \right) \times ppv \left( \frac{m}{s} \right)$$

## BDI – Blast Damage Indicator



# CASO STUDIO 1. Ottimizzazione della tecnica di coltivazione di una miniera di marna a cielo aperto per la riduzione degli impatti ambientali





Sono state eseguite numerose prove per individuare l'interconnessione *ppv* – **carica per ritardo – distanza**.

La marna presenta stratificazione sub-orizzontale, con inclinazione di circa  $25^\circ$  e spessore degli strati di circa 20 cm.

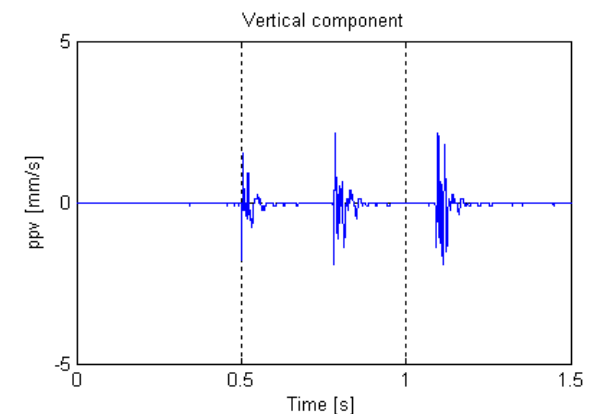
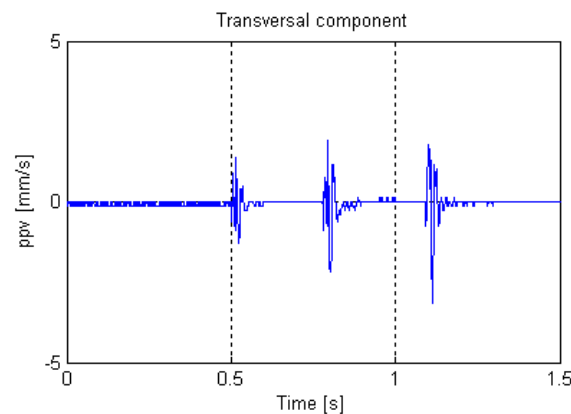
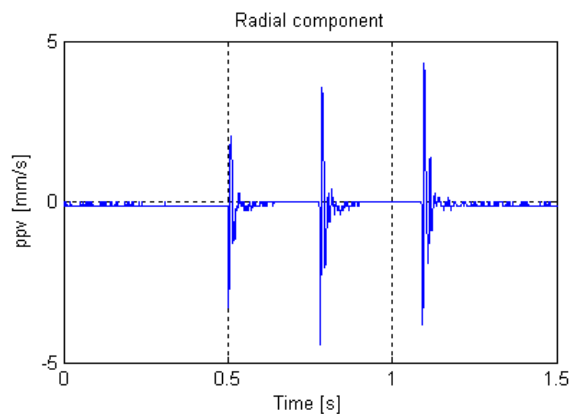


La particolare geologia del sito ha suggerito la definizione di **2 direzioni preferenziali**, rispettivamente parallela (N-S) e perpendicolare (W-E) all'immersione degli strati di marna, **per effettuare le misure**; in tal modo si possono ottenere **due differenti leggi di sito**, nel caso di significative differenze fra la propagazione delle vibrazioni nel mezzo.





La distanza fra la miniera e le abitazioni da proteggere si ridurrà nel prossimo futuro fino a raggiungere 70 m.



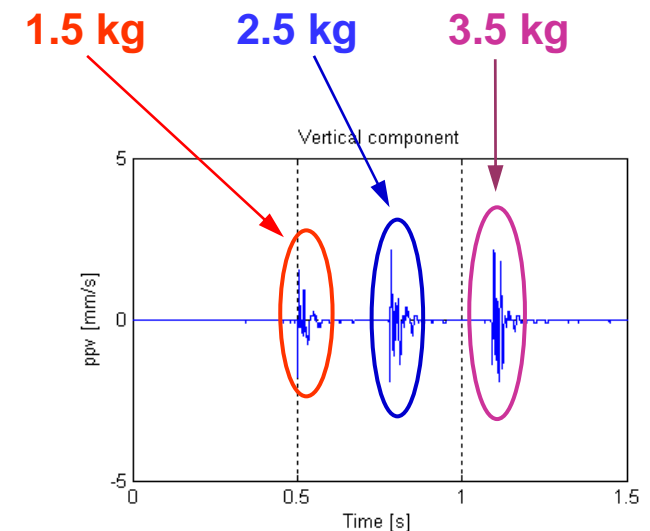
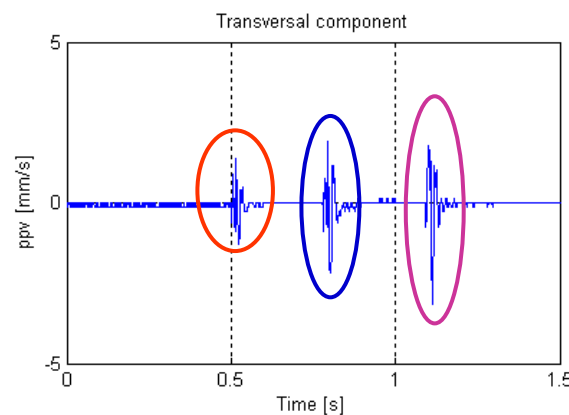
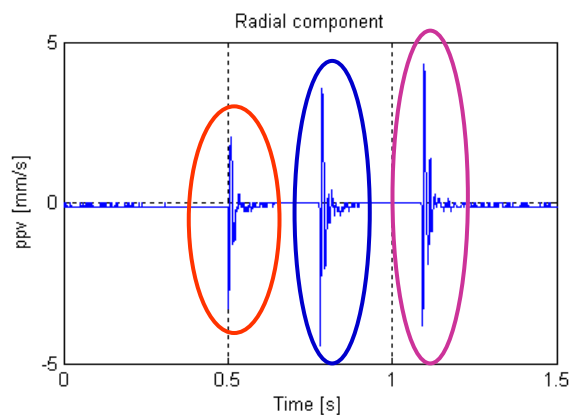
**Prima dei tiri di prova si ricorreva a:**

**Geometria:** altezza gradino: 3 m; diametro di perforazione: 64 mm; lunghezza dei fori: 3.3 m; maglia di tiro: 2.5 m (spalla) x 2.6 m (interasse); numero di file: 2.

**Blast design:** carica per foro: 3 kg (emulsione); sistema di innesco: non-elettrico; ritardi: 25 ms; powder factor (*P.F.*): 0.19 kg/m<sup>3</sup>; numero di fori per volata: 50 - 60; carica totale per volata: 150 - 180 kg.



La distanza fra la miniera e le abitazioni da proteggere si ridurrà nel prossimo futuro fino a raggiungere 70 m.



**Prima dei tiri di prova si ricorreva a:**

**Geometria:** altezza gradino: 3 m; diametro di perforazione: 64 mm; lunghezza dei fori: 3.3 m; maglia di tiro: 2.5 m (spalla) x 2.6 m (interasse); numero di file: 2.

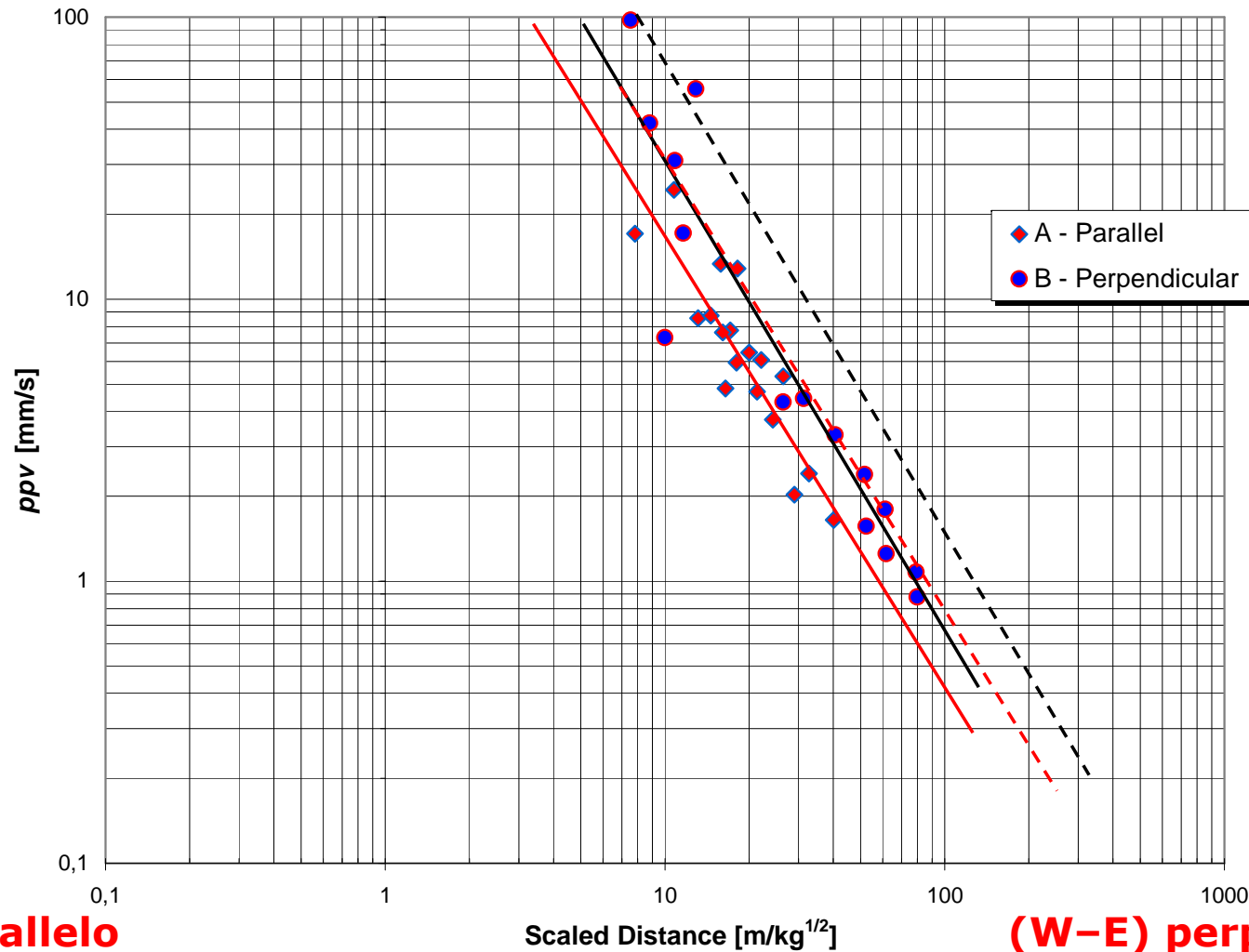
**Blast design:** carica per foro: 3 kg (emulsione); sistema di innesco: non-elettrico; ritardi: 25 ms; powder factor (*P.F.*): 0.19 kg/m<sup>3</sup>; numero di fori per volata: 50 - 60; carica totale per volata: 150 - 180 kg.





**Risultato di una volata:  
volume abbattuto 2000 m<sup>3</sup>,  
P.F. 180-190 g/m<sup>3</sup>.**

# Intervallo di confidenza: 95%

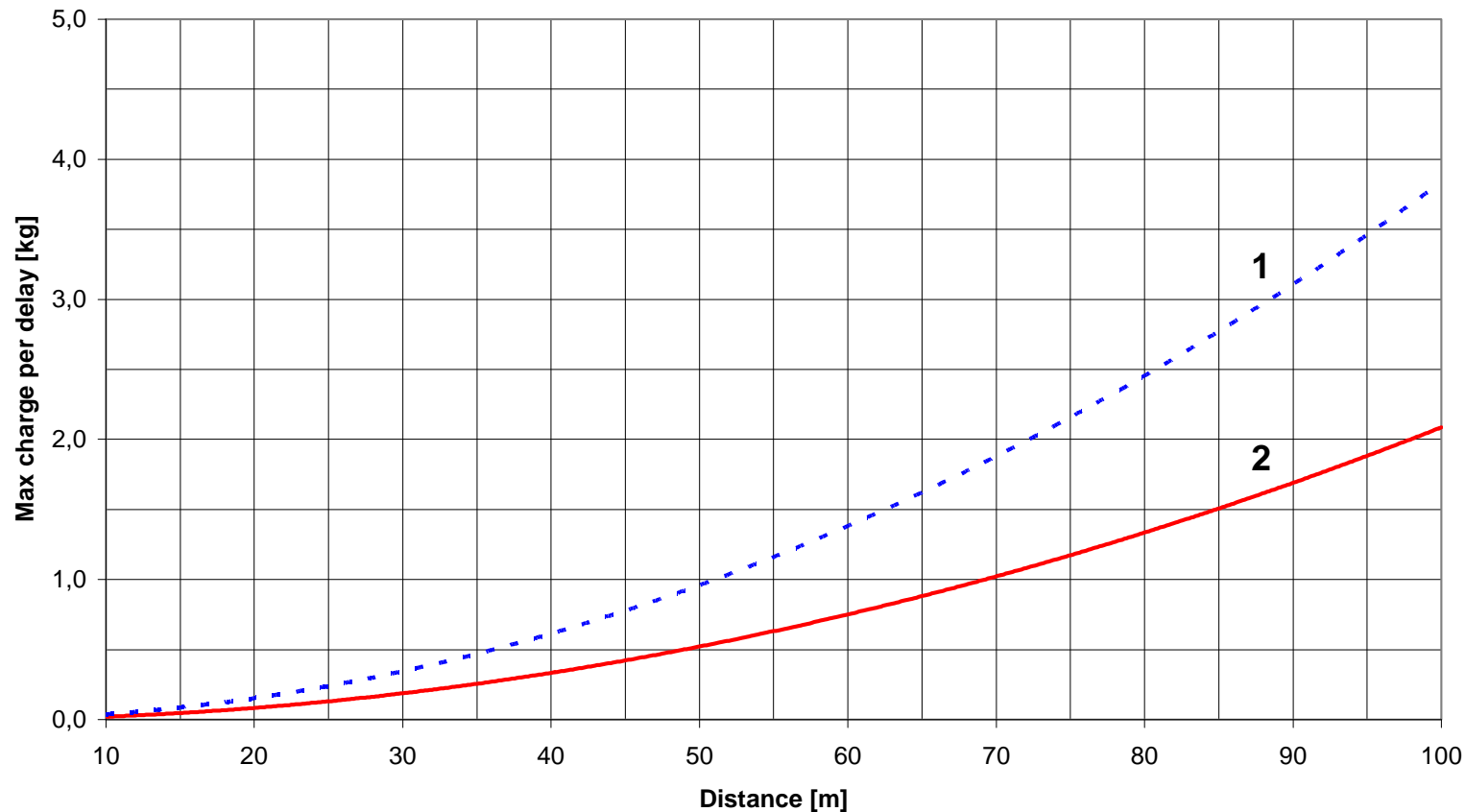


**(N-S) parallelo  
(R=0.79)**

$$ppv = 1213.6 \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{cpd}} \right)^{-1.60}$$

**(W-E) perpendicolare  
(R=0.88)**

$$ppv = 3685.2 \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{cpd}} \right)^{-1.68}$$



**1:  $ppv$  max = 5 mm/s (edifici di civile abitazione); 2:  $ppv$  max = 3 mm/s (strutture delicate).**

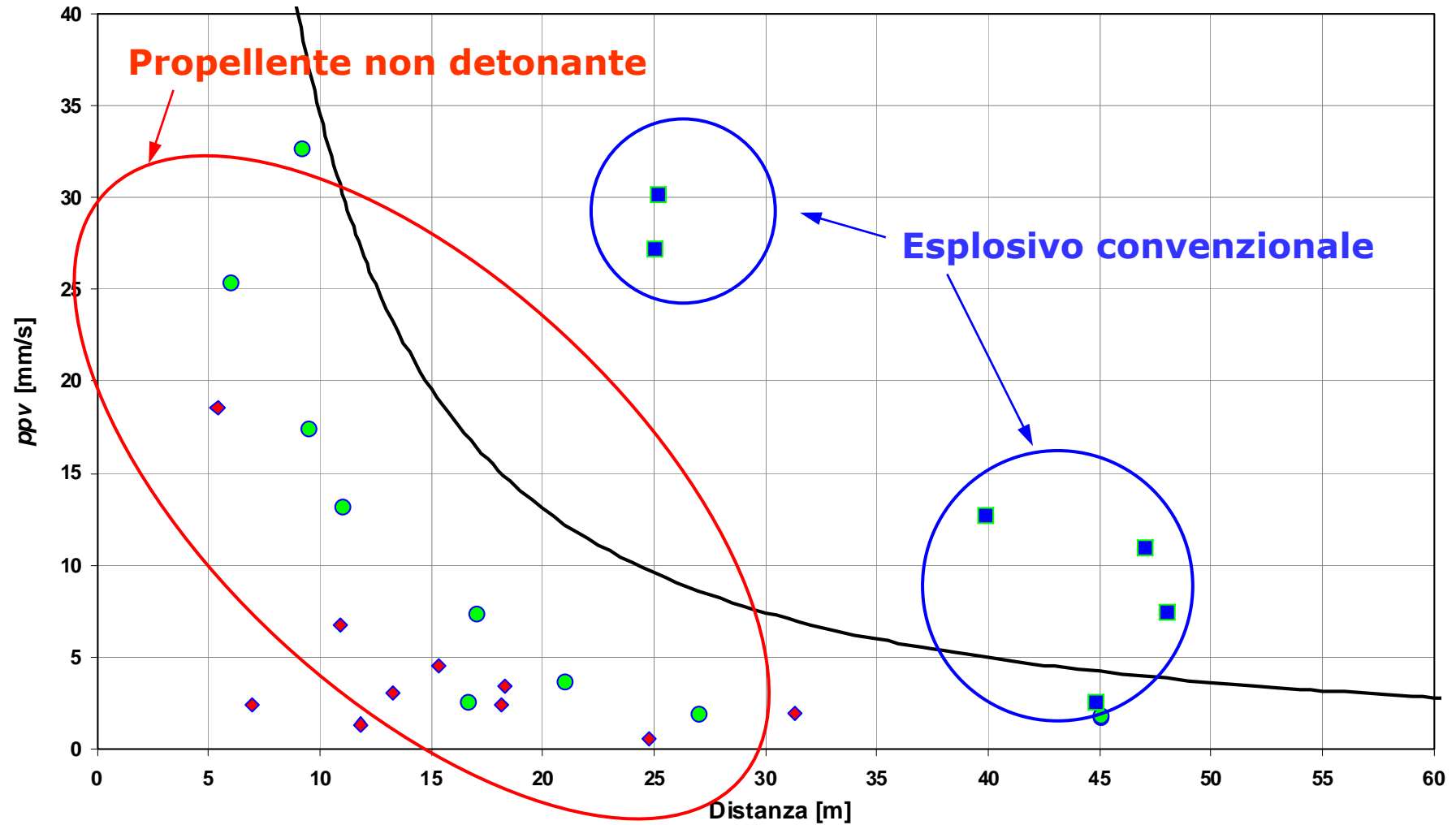
Si nota che, per una distanza di circa 70 m, la massima  $cpd$  suggerita non deve superare 2 kg/ritardo, con una massima  $ppv$  di 5 mm/s.

Se la massima  $ppv$  non deve eccedere 3 mm/s, non si deve superare la  $cpd$  pari a 1 kg/ritardo.

Essendo la precedente  $cpd$  adottata pari a 3 kg, la si è ridotta a 2 kg per rispettare i limiti. Tale soluzione comporta diametri minori (perf. e cartucce) e maglia di tiro più fitta, per distribuire meglio la carica in foro, a parità di powder factor (P.F.) di 0.19 kg/m<sup>3</sup>.



## Comparazione fra un propellente non detonante (Nonex) e un esplosivo convenzionale attraverso la legge di sito



Confrontando i dati del sistema Nonex rispetto all'esplosivo, si osserva che a parità di **cpd (1 kg)** si ottengono mediamente valori di *ppv* inferiori dell'**80%**.

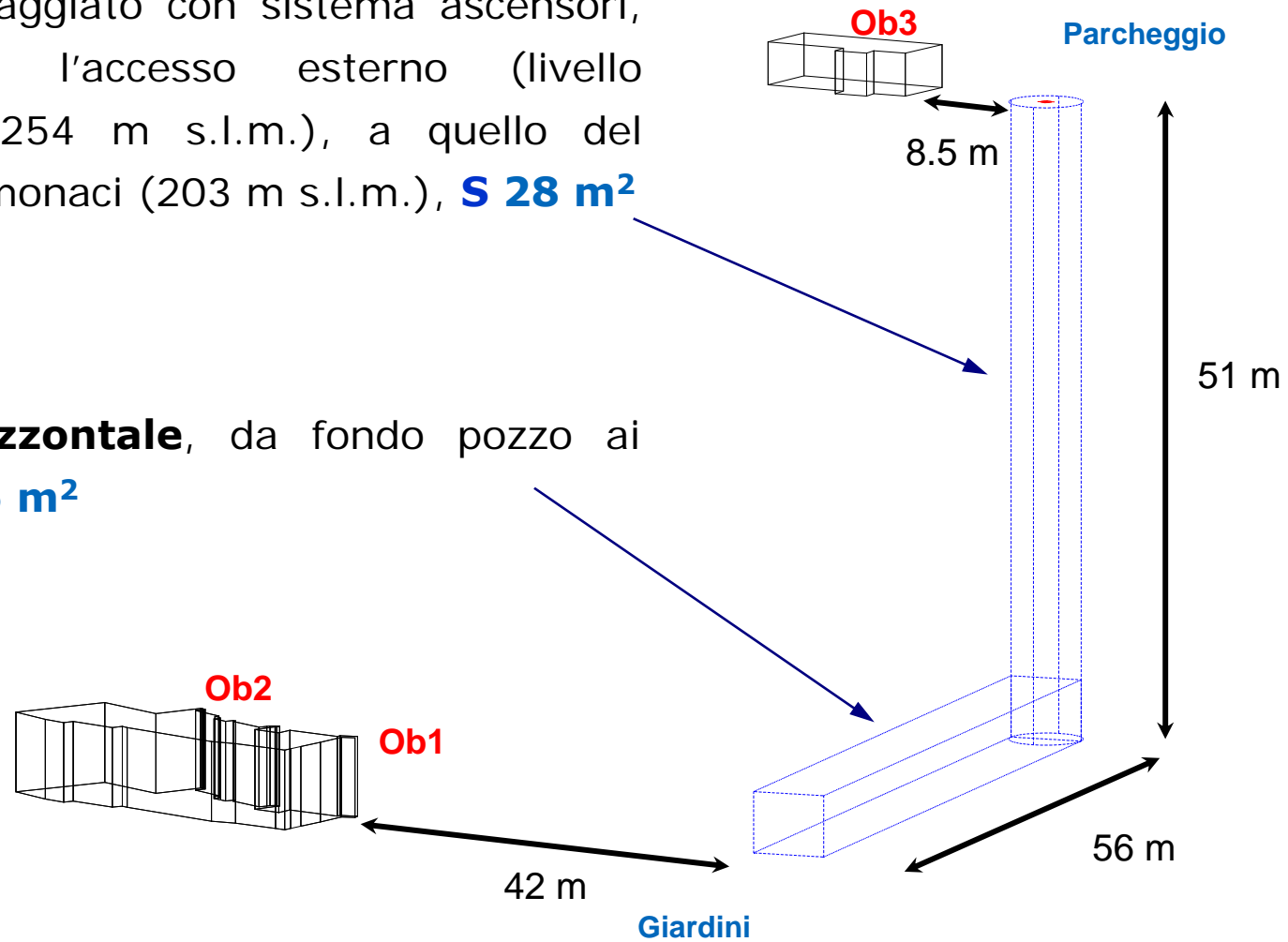
## CASO STUDIO 2. Monitoraggio sismico preliminare per valutare la possibilità di realizzare con esplosivo il pozzo ascensore e la galleria di accesso all'Eremo di S. Caterina del Sasso



## Vista 3D: pozzo – galleria e oggetti da proteggere

**Pozzo** equipaggiato con sistema ascensori, che collega l'accesso esterno (livello parcheggio, 254 m s.l.m.), a quello del giardino dei monaci (203 m s.l.m.), **S 28 m<sup>2</sup>**

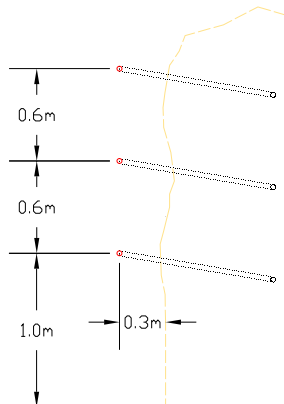
**Galleria orizzontale**, da fondo pozzo ai giardini, **S 25 m<sup>2</sup>**



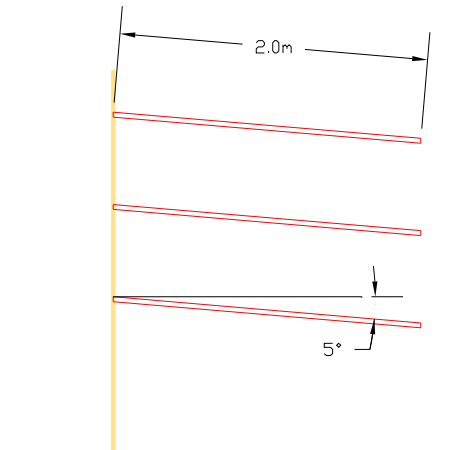
## Dimensionamento dei tiri di prova in zona A

Simulazione delle volate di produzione effettive (ampliamento di una preesistente cavità).

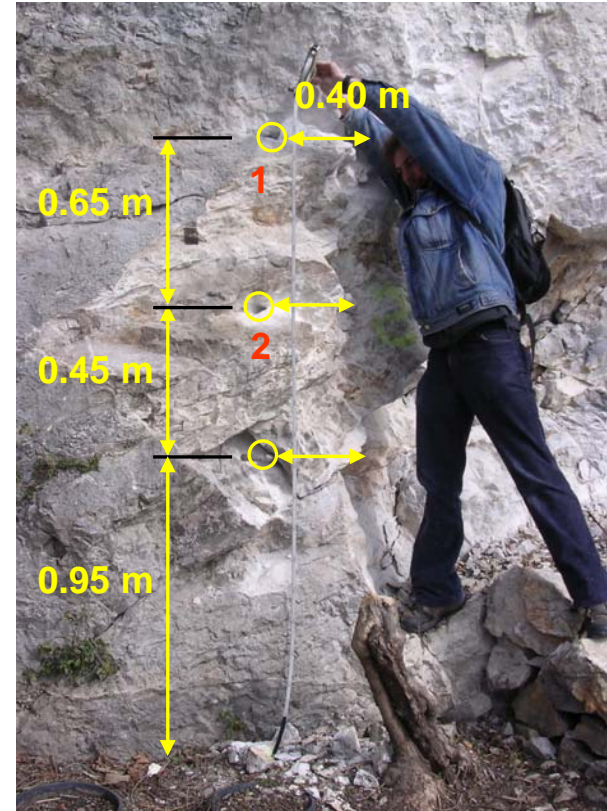
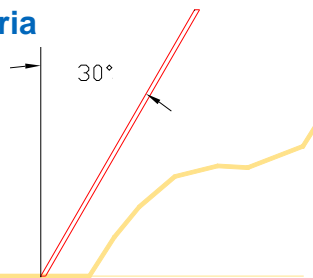
Vista frontale



Sezione verticale



Planimetria

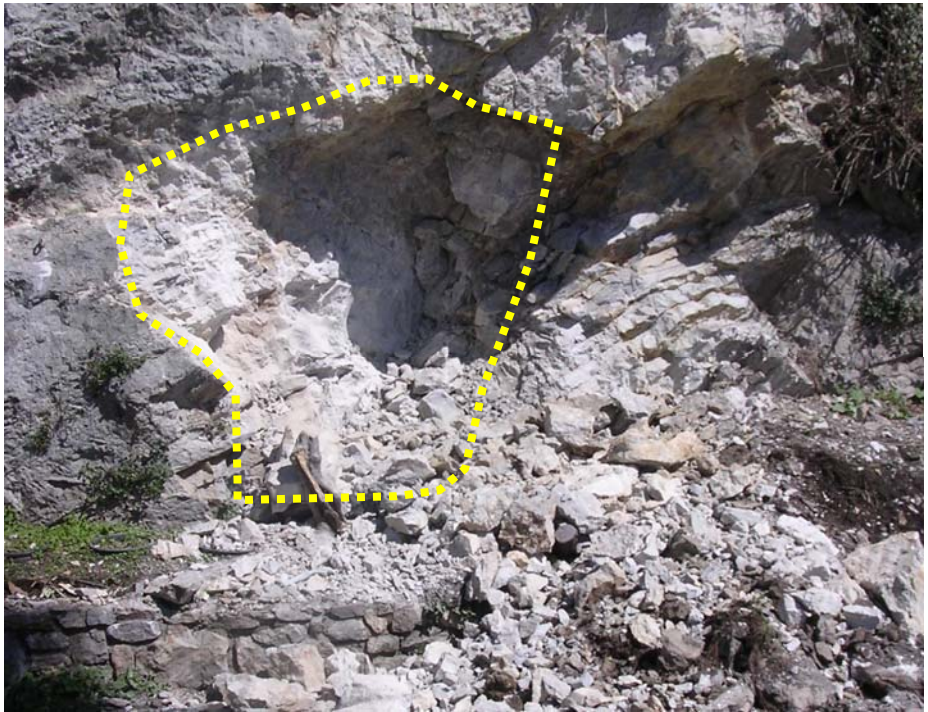


2 mine caricate con 1.06 kg ciascuna  
(brillate simultaneamente)

1 mina caricata con 1.06 kg (brillata  
dopo 250 ms)



# Risultati



Prima e dopo il brillamento

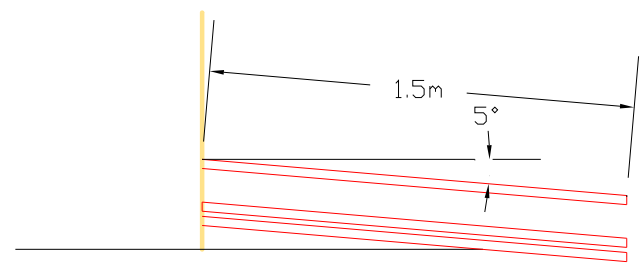


# Dimensionamento dei tiri di prova in zona B

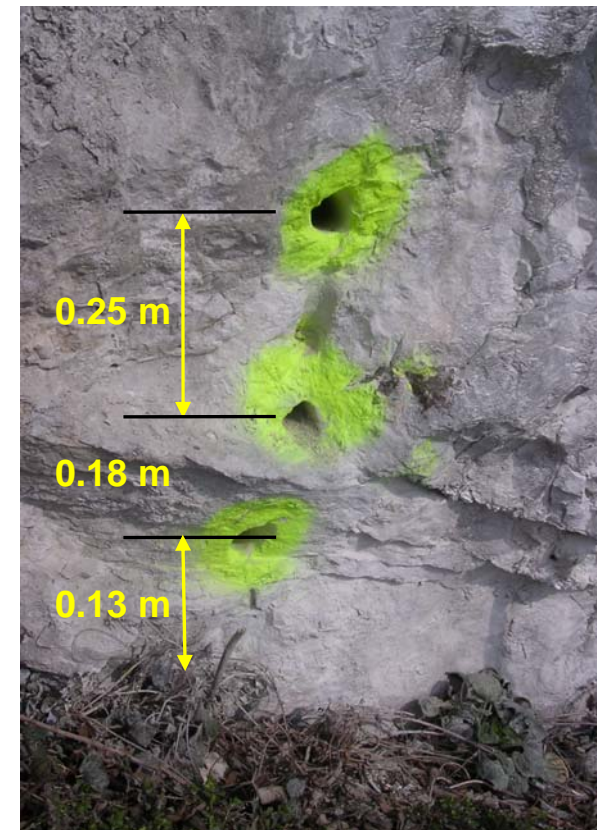
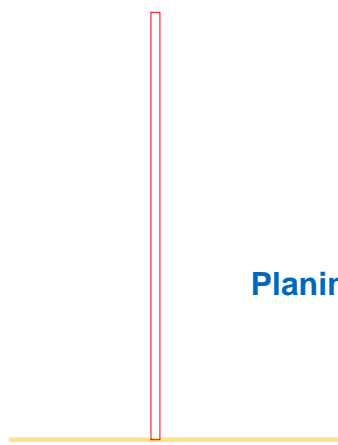
Vista frontale



Sezione verticale



Planimetria



Realizzazione di una prima apertura nella fronte di scavo



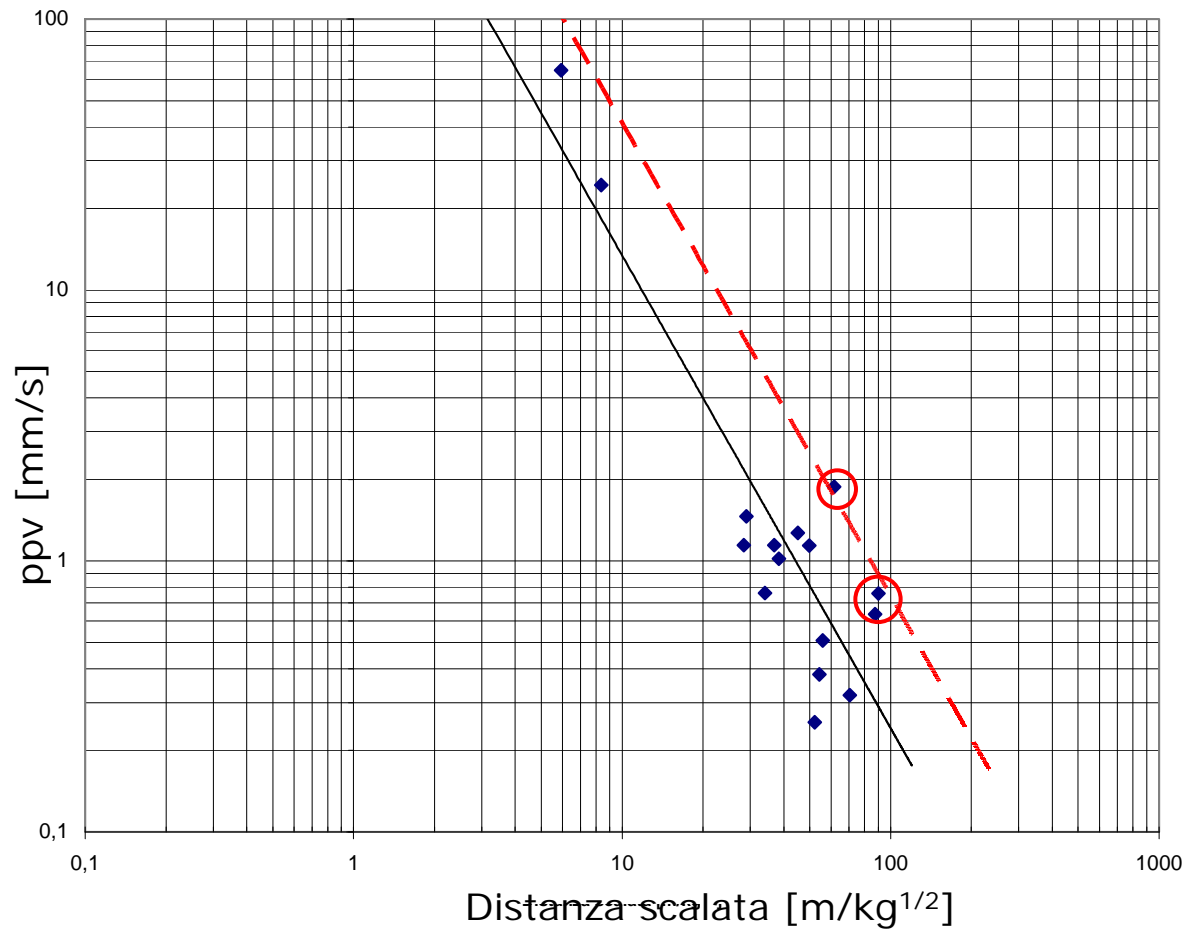
Brillamento di una mina da 0.61 kg

## Risultati

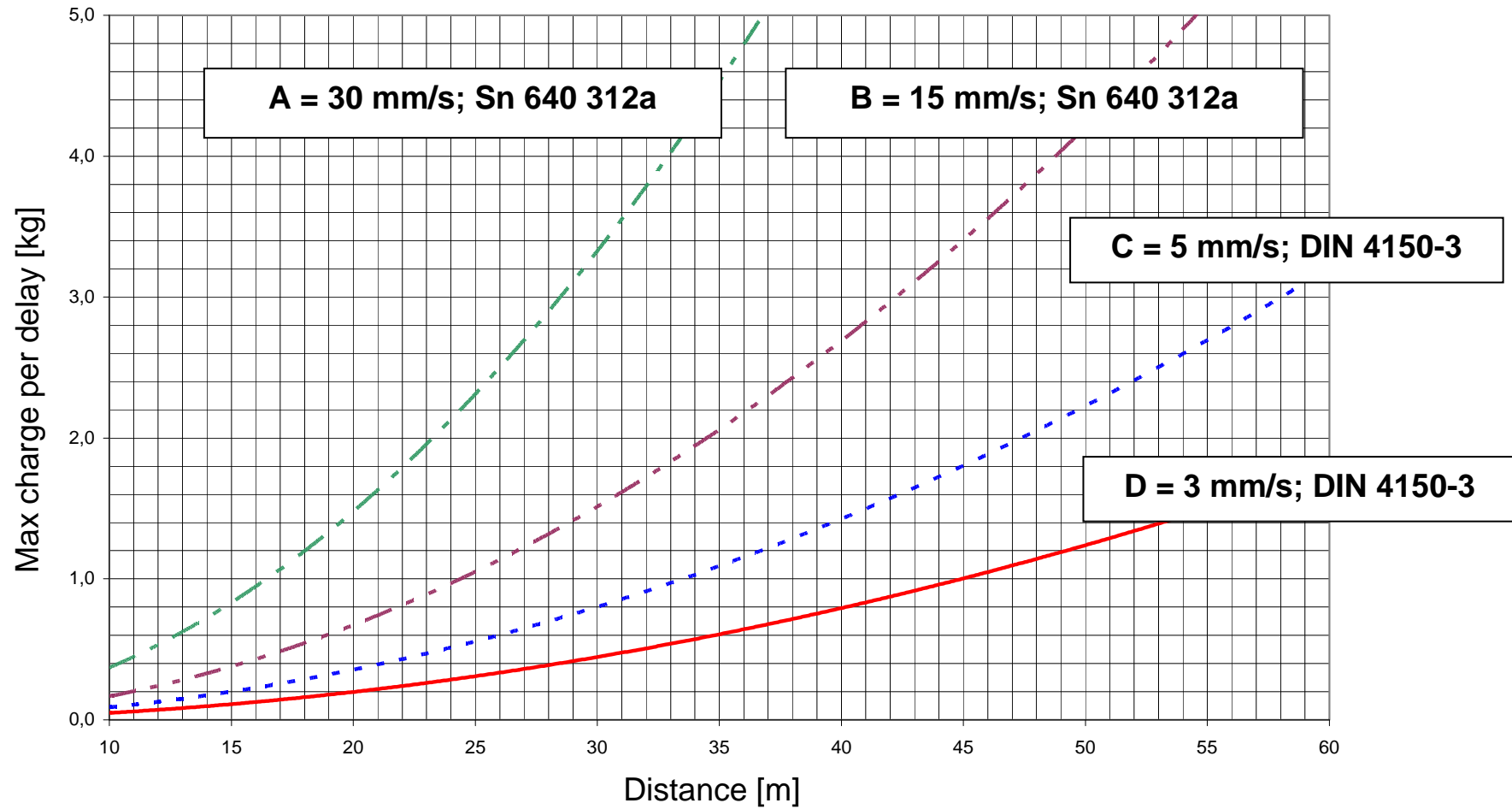


Prima e dopo il "cut blast" di una singola carica da 0.61 kg

## Legge di sito



# Correlazione fra massima *cpd* e distanza





## Conclusioni

Il limite di *cpd* individuato è di 0.5 – 1 kg per la maggior parte dello scavo, per cui lo sfondo delle volate può solo eccezionalmente eccedere il valore di 1m (al costo di una molto elevata perforazione specifica).



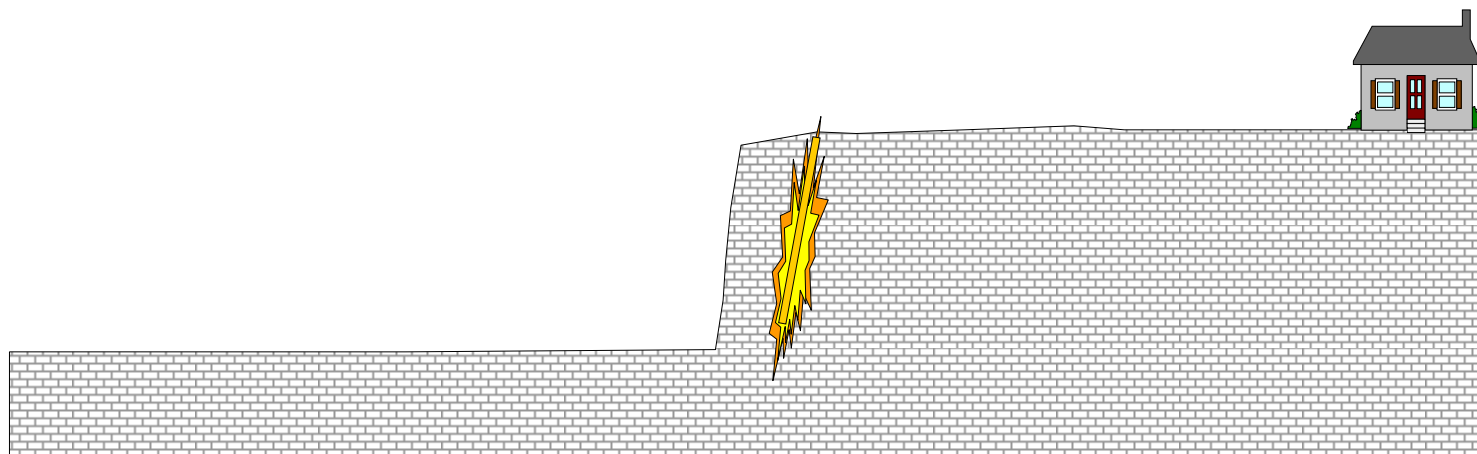
Durante i lavori di scavo, il monitoraggio è stato costante e continuativo; le *ppv* registrate non hanno superato i valori imposti dalla legge di sito preliminare.



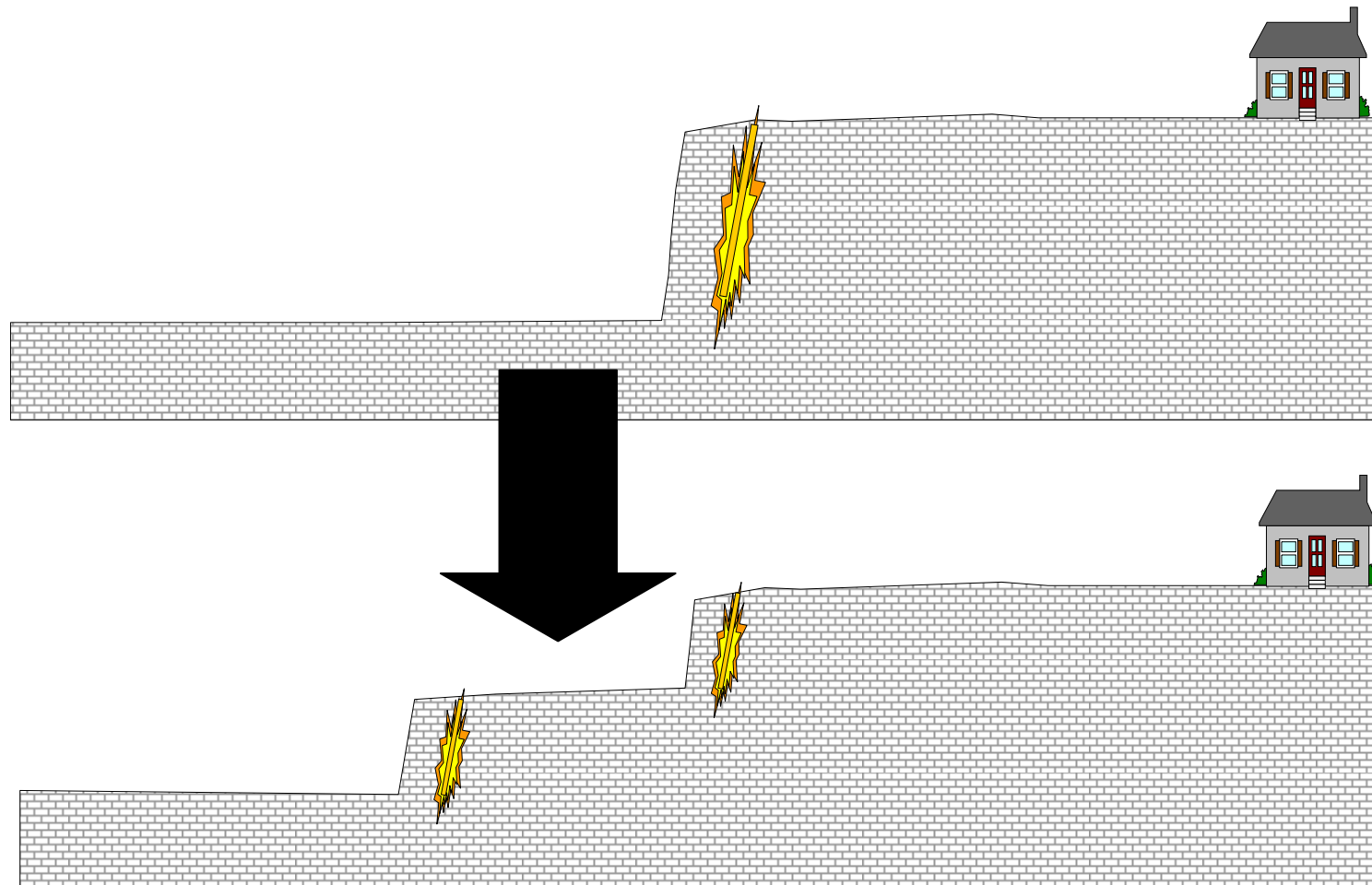


Et albertus  
et albertus  
et albertus  
et albertus

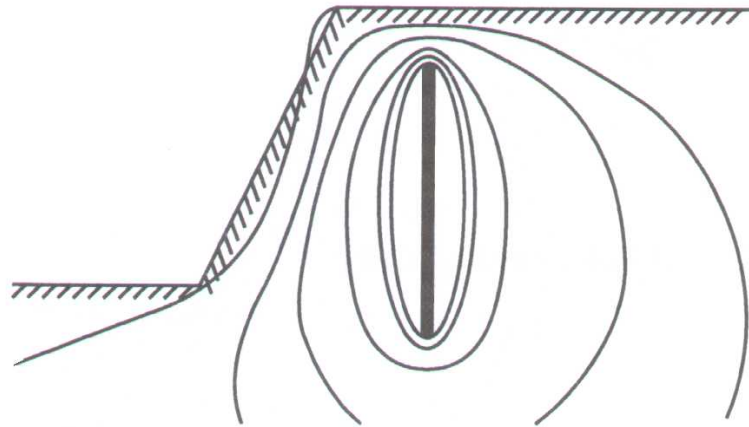
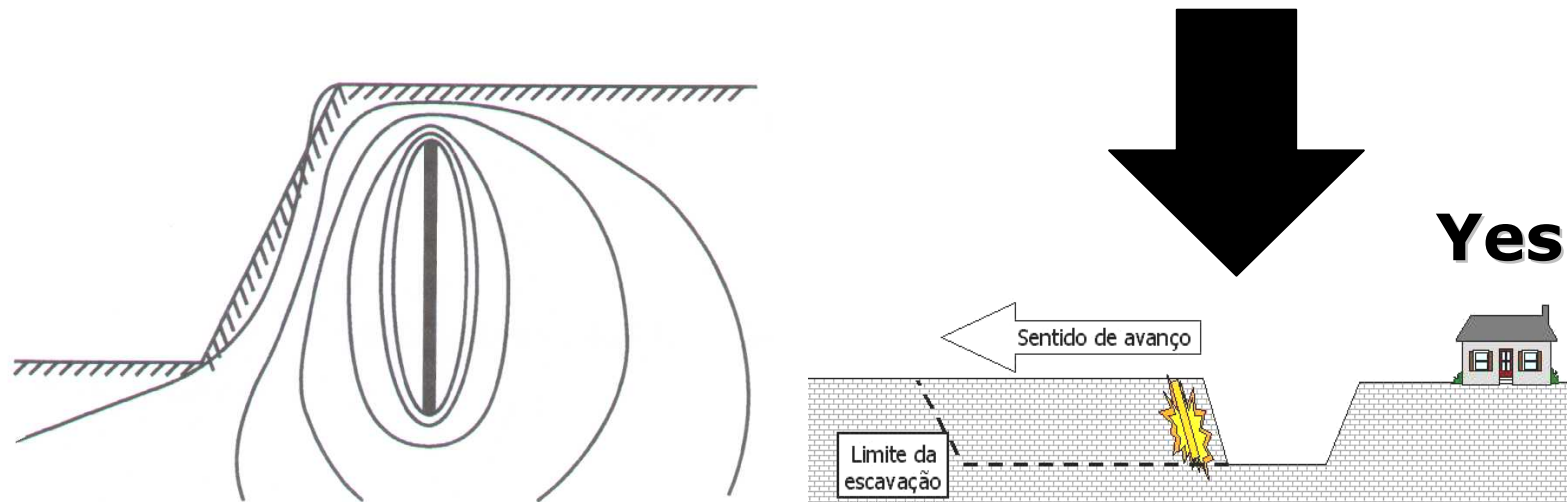
# Vibrazioni - mitigazioni



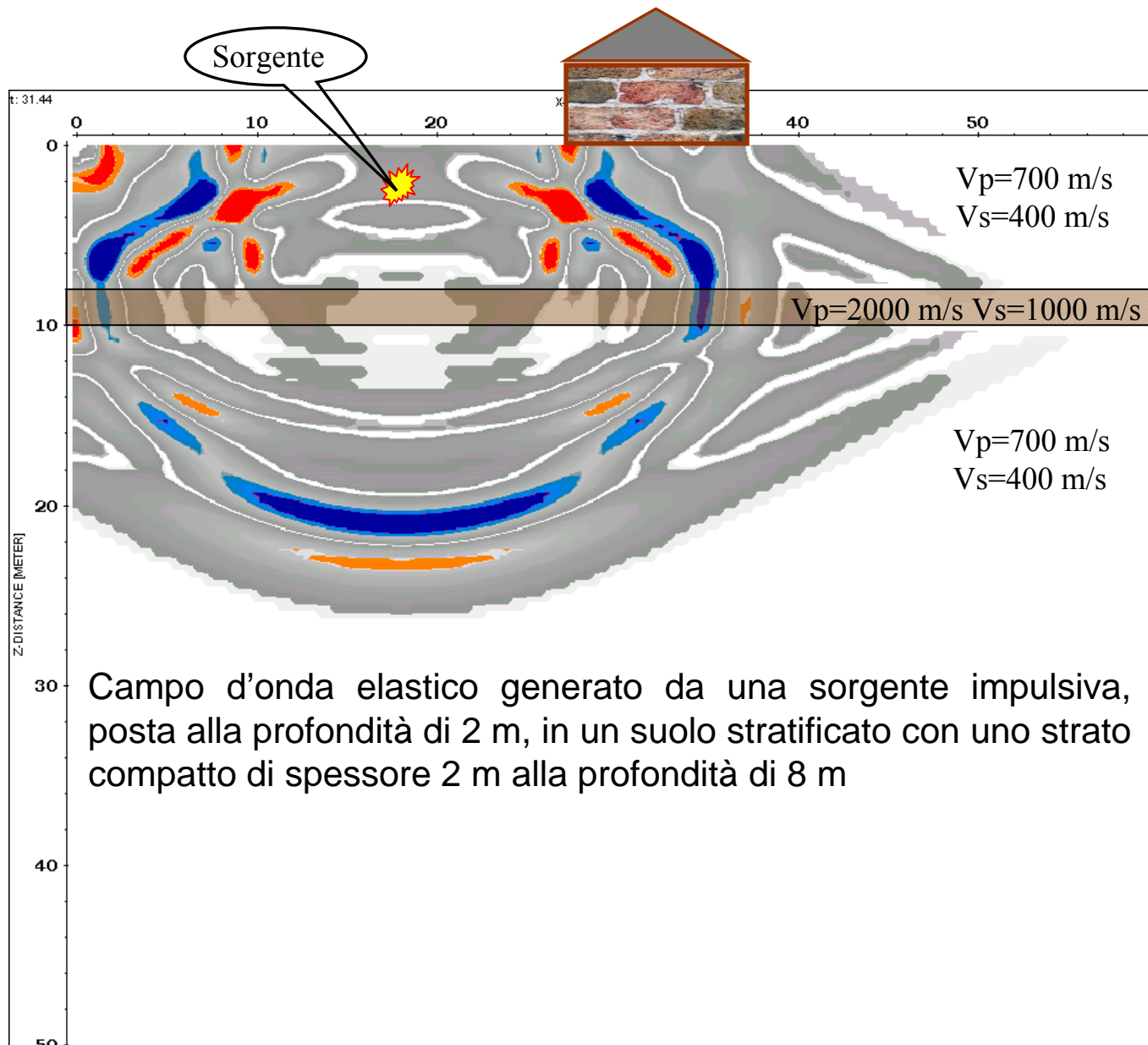
# Vibrazioni - mitigazioni



# Vibrazioni - mitigazioni

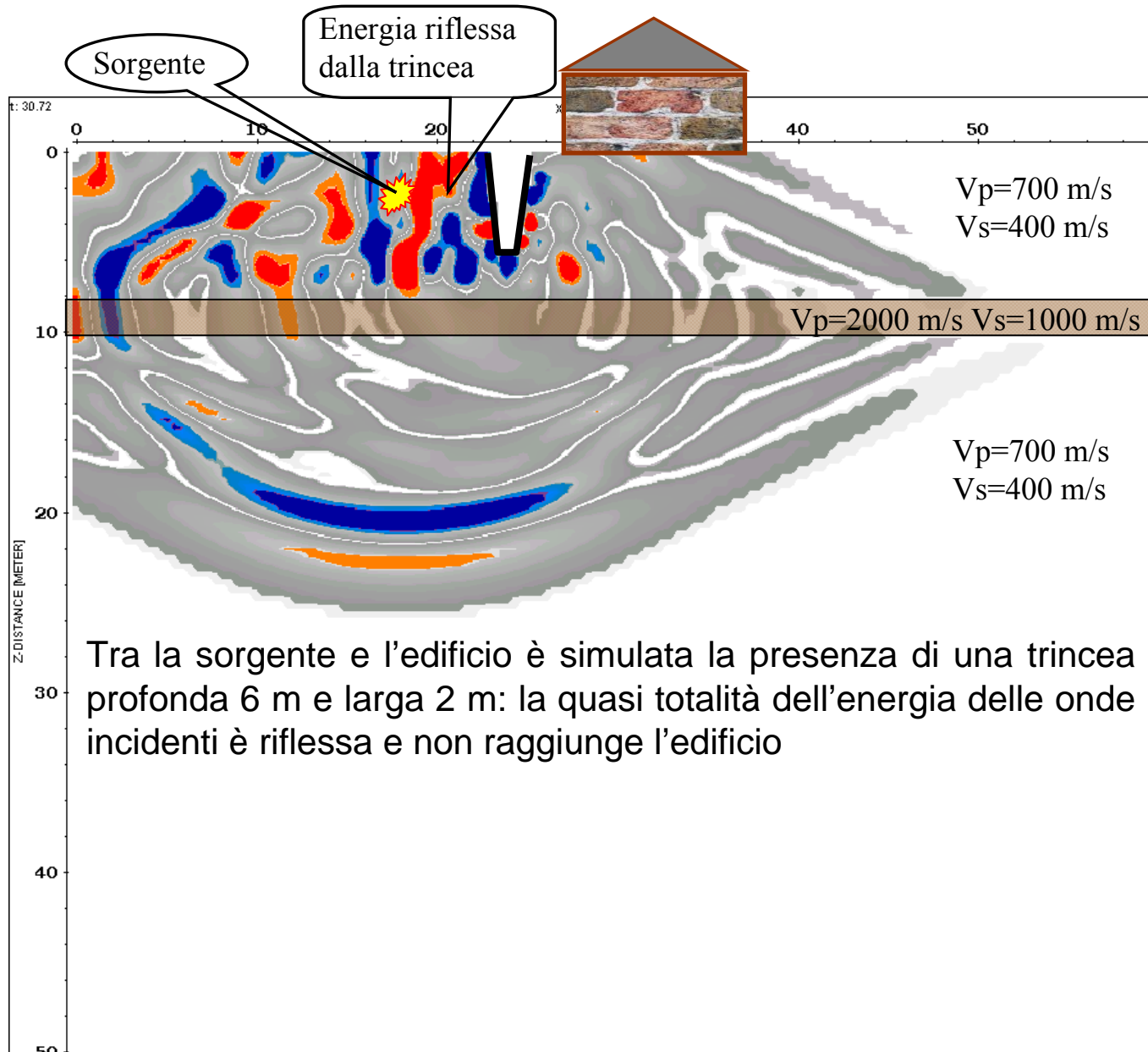


# Vibrazioni - mitigazioni





# Vibrazioni - mitigazioni

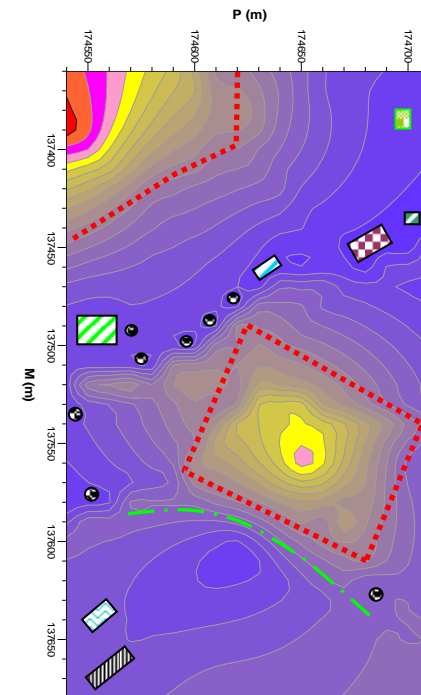


## Conclusioni

E' importante ricavare la legge di propagazione appropriata, adattata in funzione del tipo di roccia e basata su tiri di prova (**test in sito con differenti cariche di esplosivo**).

L'equazione rappresentante la legge di sito, con i coefficienti empirici correttamente adattati al tipo di roccia in esame, consente di determinare la massima carica per ritardo da impiegare, specie nei casi in cui i lavori di scavo sono in prossimità di strutture da preservare.

Ciò rappresenta uno strumento efficace, che rende possibile la realizzazione di **mappe di isovelocità** nelle aree prossime alle volate; tali mappe possono essere utili per valutare l'interferenza delle vibrazioni con le strutture in superficie da proteggere.



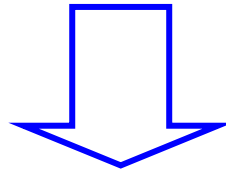
## Esempio di realizzazione di mappe di isovelocità



## **Ampliamento concessione scavo**

### **Incognite riscontrate per l'ampliamento dell'area di cava:**

- Vibrazioni: lesioni o danni su edifici limitrofi causati dall'impiego dell'esplosivo;
- Rumore generato dai mezzi impiegati (dumper, perforatrici);
- Polvere (perforatrici, volate, frantoio);
- Stabilità del fronte finale di cava.

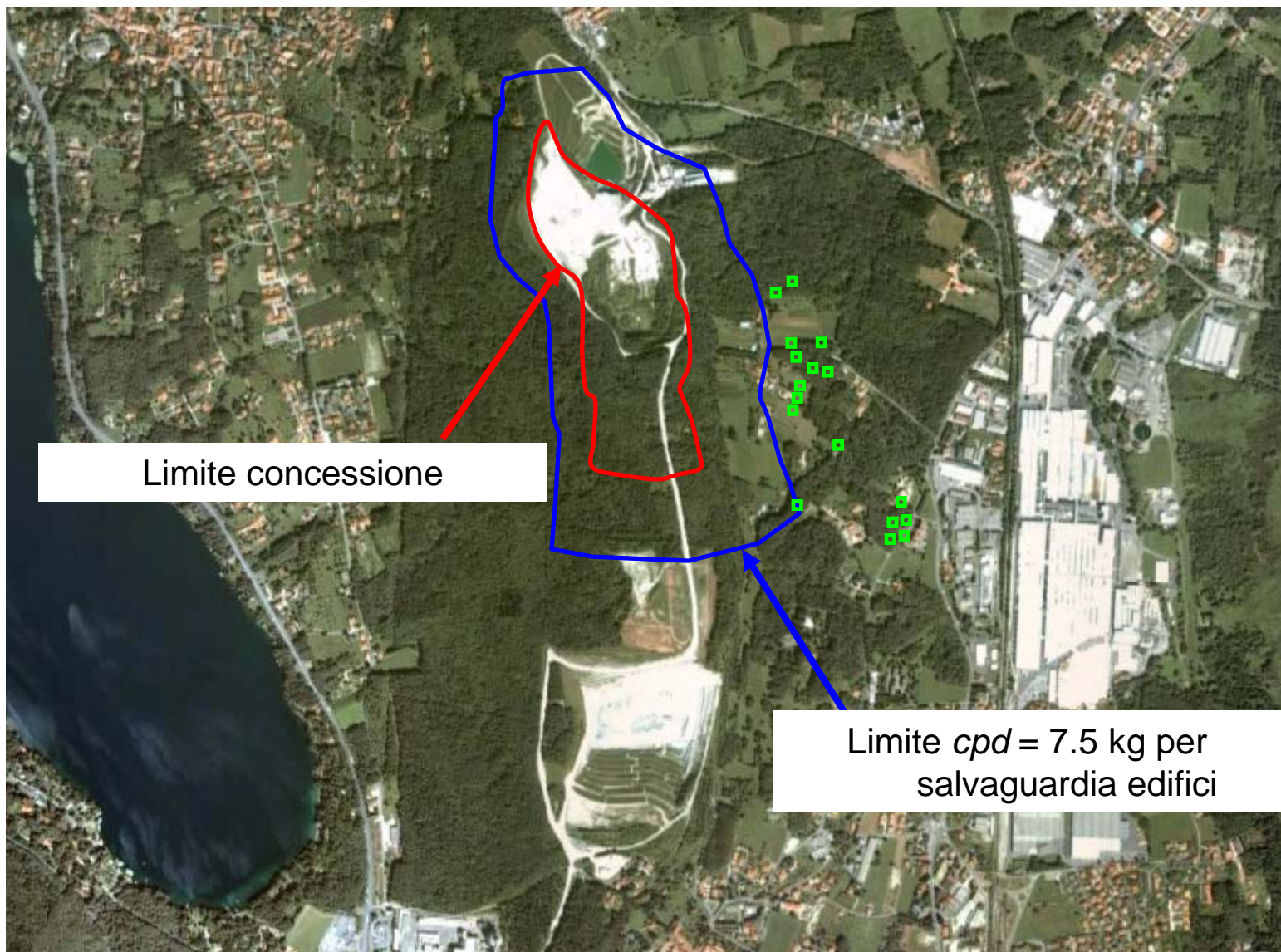


### **Soluzioni proposte:**

- Studio della propagazione delle vibrazioni nell'ammasso roccioso;
- Definizione di un'area di rispetto;
- Monitoraggio continuativo per il controllo di eventuali anomalie;
- Modifica del piano di tiro o, eventualmente, modifica della tipologia di esplosivo impiegato.



## Ampliamento concessione scavo







ISTITUTO ASCANIO SOBRERO  
per la Ricerca sugli Esplosivi e la Detonica

# **EXPLO 2010**

*Esplosivi civili, Pirotecnia, Esplosivi militari*

**GIORNATA IN RICORDO  
di**

**PIETRO BALLESTRAZZI ED ENZO MARIA DANTINI**

**22 Ottobre 2010**

**Vibrazioni indotte dall'abbattimento con esplosivi.  
Analisi di casi studio ed esempi di monitoraggio,  
alla luce della normativa vigente**

**Marilena Cardu** – *DITAG Politecnico di Torino; IGAG CNR; Torino*