

**NOTE DI  
CONSULENZA TECNICA  
SU POSSIBILI EFFETTI DANNOSI  
LEGATI ALLA PRESENZA DI FAUNA  
ITTICA IN PROSSIMITA' DI SCAVI A  
MEZZO ESPLOSIVO PRESSO INVASO  
IDROELETTRICO EDISON  
BARCIS (PN)**



# Sommario

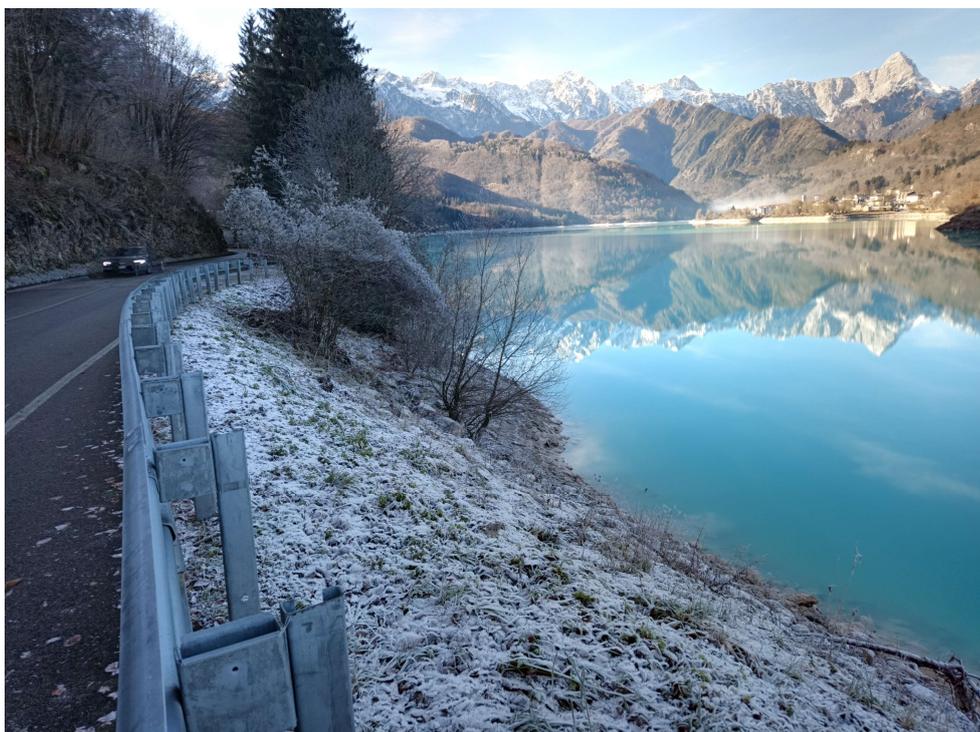
1	PREMESSE.....	3
2	NOTE GENERALI TEORIA ESPLOSIVISTICA.....	4
3	VIBRAZIONI.....	6
3.1	DESCRIZIONE DELLE VIBRAZIONI.....	7
3.2	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA UN MATERIALE ALL'ALTRO .....	11
3.3	CALCOLO PREVISIONALE DELLA VIBRAZIONE INDOTTA DAL BRILLAMENTO DELLE CARICHE .....	15
3.4	LEGGI EMPIRICHE PER LA VALUTAZIONE DELLA VIBRAZIONE INDOTTA DAL BRILLAMENTO DELLE CARICHE .....	16
4	GLI SCAVI DI BARCIS.....	21
5	CONCLUSIONI.....	28

## 1 PREMESSE

Questo Istituto ha accettato incarico di Consulenza per conto della Edison S.p.A., in merito alla possibilità che una serie di scavi, fra cui uno sbancamento verticale ed una galleria in Comune di Barcis, visto l'utilizzo di materiali esplosivi, possa creare danni alla fauna ittica nell'invaso limitrofo.

Va sottolineato fin da subito che le esplosioni per scavo vanno annoverate fra i disturbi "sporadici" che, facendo il parallelo con ad esempio i disturbi fonometrici, consentono soglie di rischio ben maggiori.

È evidente che, almeno in Italia, non sia in auge una Normativa con le soglie di rischio per la fauna ittica. Ossia non si può sapere esattamente a che picco vibratorio il pesce possa subire danni. Questo anche per l'enorme varietà di organismi acquatici sui quali stabilire le soglie di rischio.



*Figura 1 – Aree interessate agli scavi*

Conscio che il documento redatto dallo scrivente, possa essere utilizzato in sedi nelle quali non siano chiare le questioni tecniche, redigo le successive note, con una trattazione dei capisaldi della materia esplosivistica legata agli impulsi vibratorii.

## 2 NOTE GENERALI TEORIA ESPLOSIVISTICA

L'impiego di esplosivo produce, sull'ambiente circostante, in prossimità ed a distanza, effetti di varia natura.

Tra gli effetti desiderati sicuramente possiamo annoverare:

- distacco di un determinato volume di materiale;
- comminuzione di tale volume in elementi di ben definite dimensioni;
- spostamento del materiale distaccato e frantumato.

Tra gli effetti collaterali non desiderati sono:

- sovraproiezioni di detriti
- vibrazioni
- perdite nell'atmosfera
- sovracomminuzione di parte della roccia abbattuta, o fratture e deformazioni permanenti nella roccia che resta in posto.

Si dovranno quindi prevedere tali effetti, al fine di evitare contestazioni di qualsiasi tipo.

A tal proposito si nota che sussistono spesso timori o pregiudizi in relazione all'uso e agli effetti dell'esplosivo. Tra chi impiega esplosivo e chi ne subisce gli effetti a distanza, di qualunque natura questi siano, insorgono così a volte contestazioni complesse che possono degenerare in procedimenti legali di dubbia fondatezza.

Il progettista del tiro, conformemente alle condizioni al contorno dell'area di scavo, molto variabili di caso in caso, deve poter prevedere, sulla base di relazioni empiriche e calcoli, l'entità degli effetti indesiderati prodotti dalle cariche esplosive.

Una carica esplosiva situata in un mezzo indefinito provoca, al momento dell'esplosione, la formazione di regioni in cui il materiale subisce sollecitazioni diverse, in base alla distanza dalla carica stessa. In particolare, si avrà, a partire dall'asse della carica:

- una zona in cui il materiale, sollecitato oltre il limite di rottura, subisce un'intensa frattura;
- una zona di deformazioni permanenti;

- una zona in cui le deformazioni prodotte risultano inferiori al limite di elasticità. A questo punto l'onda esplosiva si trasforma in onde elastiche che si propagano nel terreno, attenuandosi a distanza.

D'altra parte, l'azione generata dai gas in espansione sull'aria dà origine ad un'onda di compressione nell'atmosfera; in quest'ultima si propaga, inoltre, qualsiasi rumore connesso con l'esplosione. L'onda di pressione, conseguente alla detonazione delle cariche esplosive, può essere causa di disturbo e danno per strutture e persone vicine alla zona di intervento, in termini di rumore, fastidio e timore. Gli effetti e le reazioni dipendono dai livelli delle vibrazioni, dalle frequenze in gioco, dalla sovrappressione in aria, dalla tipologia degli edifici e dalla posizione delle persone negli edifici.

In particolare, onde elastiche nel terreno e sovrappressioni nell'atmosfera sono indotte dall'energia residua prodotta dall'esplosione, ma non utilizzata per la frantumazione ed abbattimento della parte di struttura minata.

I problemi di sicurezza e di impatto ambientale, per quanto riguarda invece l'energia utilizzata in tali processi, sono legati al lancio di materiale.

Non dimentichiamo inoltre che alla componente verticale della velocità di vibrazione nel terreno è associata una pressione in aria, percepita dall'uomo come rumore a bassa frequenza e quindi di possibile disturbo psicologico.

E d'altro canto, si tende erroneamente a pensare che l'utilizzo di mezzi meccanici possa sempre permettere di controllare maggiormente l'immissione di energia nell'ambiente esterno. Ovviamente non è così, sia per quanto riguarda i rumori che le vibrazioni stesse.

Questi due effetti, caratterizzati dalla propagazione tramite onde fisiche, possono anche essere di minor entità relativa, ma sicuramente, perdurando nel tempo generano il più delle volte maggior disturbo e maggiori danni.

Tanto è vero che le normative dei rispettivi settori sono più permissive con gli "impulsi" sporadici che con quelli continui, tipici questi ultimi delle lavorazioni con mezzi meccanici.

Volendo dare un'idea di massima, eseguendo un bilancio sul totale dell'energia espressa da una carica di esplosivo in cava, si potrebbe abbozzare il seguente conteggio:

- a) distacco <15%
- b) frantumazione 15%
- e) dislocazione 4%

- d) sovraproiezione <1%
- e) deformazione della roccia verso la superficie libera della mina 5%
- f) deformazione della roccia alle spalle della mina < 1 %
- g) vibrazioni nel massiccio 40%
- h) perdite nell'atmosfera 38%-39%

L'obbiettivo del fochino esplosivista competente è quella di ridurre progressivamente quel 40% di energia che si disperde sotto forma di vibrazioni.

Questo risultato si raggiunge in primis riducendo il consumo specifico di esplosivo (rapporto fra la quantità di esplosivo in base al volume da frantumare), ma anche, all'occorrenza con modifiche alle geometrie di scavo, di incremento di inneschi, di tecniche particolari di tiro, ecc

### **3 VIBRAZIONI**

Lo studio delle vibrazioni è finalizzato a:

- conoscere quali livelli di sollecitazioni possono essere generati dall'esplosione e dall'eventuale urto da impatto del materiale lavorato;
- individuare e caratterizzare le strutture poste al contorno;
- valutare quali sono i limiti di tollerabilità da adottare;
- progettare in funzione delle predette limitazioni.

Nella normale prassi operativa si adotta un'ipotesi progettuale di tiro e si definisce in via teorica la sollecitazione prodotta che viene poi trasferita alla struttura o all'ambiente da tutelare. In base ai limiti di tollerabilità definiti dalle normative si verifica la compatibilità oppure la necessità di affinare la progettazione sino al raggiungimento dell'obiettivo. Analogamente, si potrebbe partire dai valori imposti dalla normativa e determinare, in base a relazioni empiriche, la quantità massima di esplosivo da detonare.

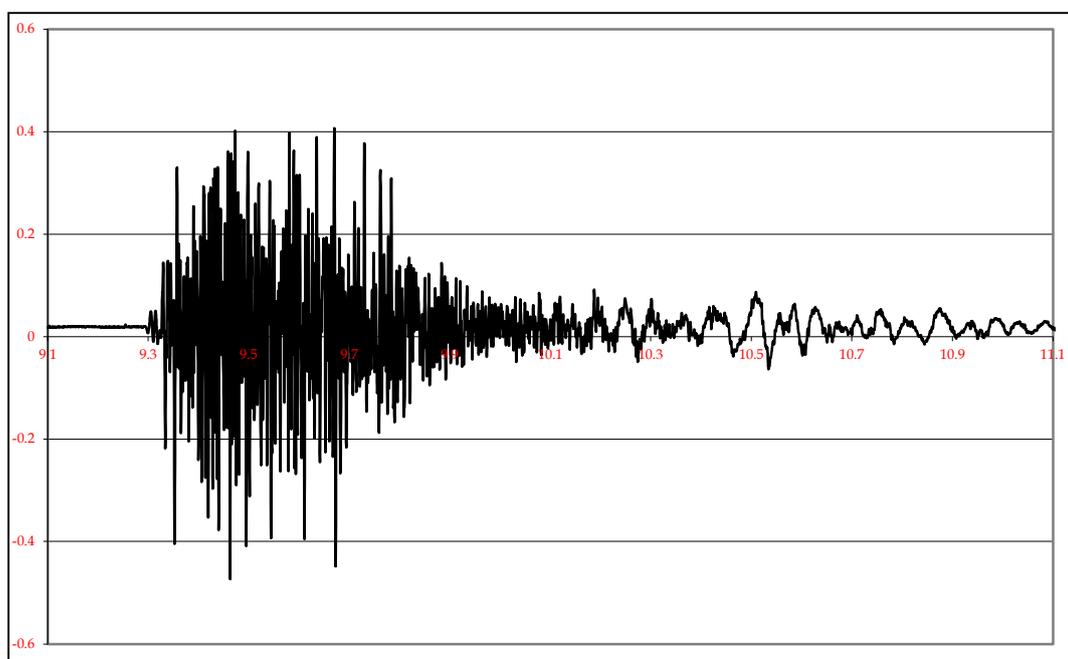
In questo capitolo s'intende presentare un quadro di conoscenze generali sul problema delle vibrazioni prodotte dall'esplosivo.

Innanzitutto, s'illustrano la natura e le caratteristiche delle vibrazioni del terreno, quindi si esaminano i diversi effetti prodotti, con riferimento ai criteri di pericolosità.

Come già evidenziato, nell'impiego di esplosivo le procedure di progetto e controllo sono riconducibili sostanzialmente alla scelta di una norma di riferimento, alla classificazione degli eventuali edifici interessati dalle sollecitazioni, alla definizione di valori ammissibili per un parametro della risposta, che vedremo essere la velocità, valori dipendenti dalla frequenza o dalle frequenze dominanti dell'onda.

### ***3.1 DESCRIZIONE DELLE VIBRAZIONI***

Descrivere una vibrazione significa elencare le posizioni in cui il punto che vibra viene a trovarsi nei tempi successivi. L'output di un rilievo vibrometrico può presentarsi in forma di tabella, in cui sono riportati i valori degli spostamenti, o accelerazioni, o velocità, assunti dal punto in tempi successivi rispetto alla posizione di riposo, ed in forma di grafico, che è semplicemente l'espressione grafica dei dati rilevati. Si veda a riguardo l'oscillogramma riportato.



*Fig. 2: Andamento dell'accelerazione subita da un punto del terreno a distanza di 20 m dal punto d'esplosione delle cariche. Registrazione effettuata con apparecchiatura accelerometrica del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano.*

Precisiamo che le vibrazioni in un punto sono rilevate mediante registrazione delle componenti dello spostamento o della velocità o dell'accelerazione del punto; se ne ottengono rispettivamente i sismogrammi, o vibrogrammi, o oscillogrammi.

Per quanto riguarda le vibrazioni strutturali, la normativa corrente prescrive l'uso della velocità vibratoria quale indice della potenzialità a causare disturbi o danni alle costruzioni. Il moto oscillatorio delle particelle del terreno, provocato dalle onde elastiche, è definibile in ogni punto con un vettore, di ampiezza ed orientazione variabili nel tempo, che rappresenta lo spostamento, o la velocità, o l'accelerazione del punto.

Con riferimento alla direzione di propagazione, le particelle vibranti, investite dall'onda, possono oscillare, rispetto al punto di riposo, in varie direzioni: secondo la direzione di propagazione, o perpendicolarmente a questa.

Le vibrazioni in un punto sono dunque l'effetto di tutte le onde sismiche che giungono a seguito dell'avvenuta perturbazione.

Le onde sismiche possono essere distinte in onde di volume ed onde di superficie.

*Onde di volume:*

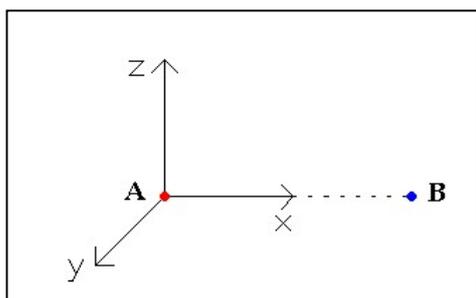
onde di compressione, longitudinali, dette onde P (lungo l'asse di propagazione  $\mathbf{x}$ );

onde di taglio, trasversali, dovute a deformazioni di taglio, appunto (lungo l'asse  $\mathbf{y}$ ).

*Onde di superficie:*

onde di superficie, perpendicolari, dette onde Love (lungo l'asse  $\mathbf{z}$ );

onde miste, dette onde di Rayleigh.



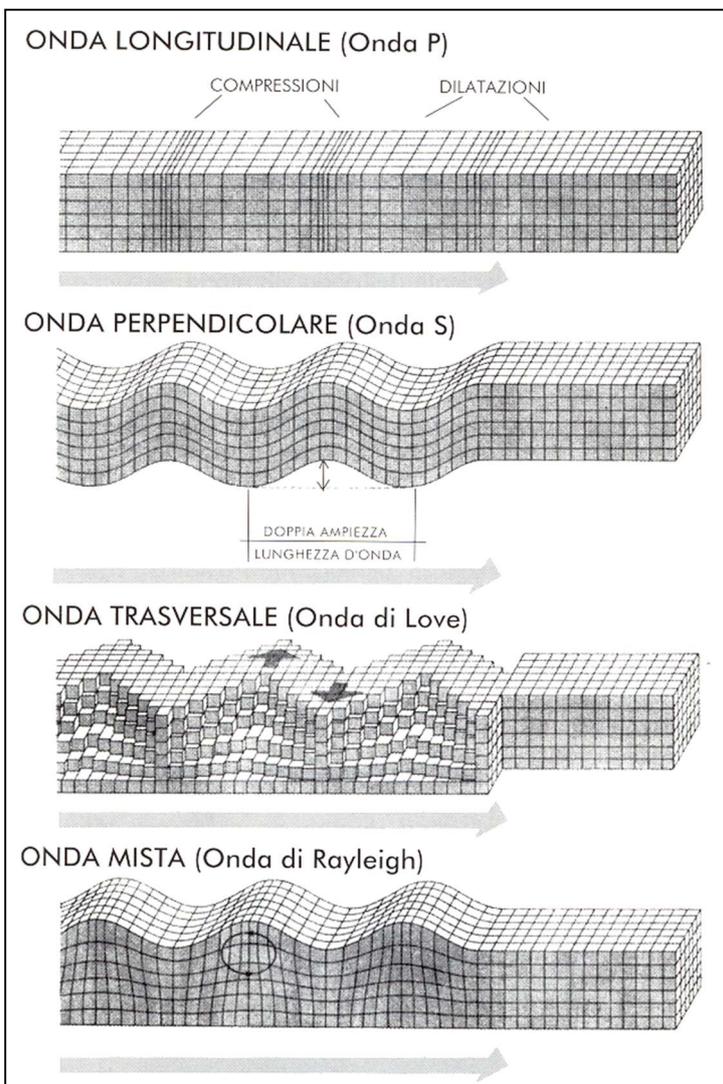
*Fig. 3: Rappresentazione cartesiana delle tre direzioni di propagazione dell'onda. A: sorgente; B: punto di misurazione.*

In tali tipi di onde l'energia viene trasmessa in modi diversi lungo un certo percorso. Per esempio, l'onda P di compressione ha origine da una pressione improvvisa in direzione della propagazione dell'onda.

Questa comprime il terreno e le particelle vicine si muovono in avanti; poi “rimbalzano” all’indietro rispetto alla posizione iniziale ed oltre, come detto in generale per il moto vibratorio.

Ogni volume di materia si contrae e si espande man mano che l’onda di compressione si muove nel terreno.

Un’onda trasversale ha invece origine da una pressione ad angolo retto con la direzione di propagazione ed ogni volume di materiale subisce quindi deformazioni di taglio.



*Fig. 4: Rappresentazione delle forme di movimento del terreno in corrispondenza dei diversi tipi di onde, da Bruce A. Bolt.*

Nel caso teorico di un mezzo elastico e omogeneo la velocità di propagazione delle onde longitudinali o di pressione è data da:

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\gamma} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$$

dove:

$\gamma$  è la densità in t/m<sup>3</sup>;

$E$  è il modulo di Young in MPa;

$\nu$  è il coefficiente di Poisson.

Tutte queste grandezze sono riferite al mezzo di trasmissione.

Chiamiamo  $u = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}}$ , allora, poiché per rocce o conglomerati cementizi normali  $u \cong 1$ , si può considerare il seguente rapporto semplificato:

$$c_p = \sqrt{\frac{E}{\gamma}}$$

Analogamente la velocità delle onde trasversali o di taglio è sempre data, in un mezzo elastico ed omogeneo, da:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\gamma}}$$

dove:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$$

$$c_t = \sqrt{\frac{E}{\gamma} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}}$$

Il rapporto  $\frac{c_p}{c_t}$  dipende quindi soltanto dal coefficiente di Poisson ed assume valori maggiori dell'unità:

$$\frac{c_p}{c_t} = \sqrt{\frac{2 \cdot (1-\nu)}{1-2\nu}}$$

L'importanza di tali considerazioni è quindi il notare che l'onda longitudinale si propaga con una velocità superiore a quella dell'onda trasversale e che è quindi la prima ad essere registrata di sismografi.

La velocità di propagazione delle onde di superficie ( $c_s$ ), in terreni coerenti, è pari a circa il 90% di quelle trasversali.

Le diverse velocità di propagazione  $c_p$ ,  $c_t$  e  $c_s$  sono quindi delle costanti del terreno che non dipendono dalla distanza, bensì dal tipo di materiale in cui l'onda si propaga e dalla omogeneità dello stesso.

### **3.2 PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA UN MATERIALE ALL'ALTRO**

Al passaggio attraverso dislivelli, cavità, fessure e diversi strati di roccia o calcestruzzo, avviene una formazione di onde di riflesso con un ulteriore smorzamento del grado di oscillazione, cioè dell'ampiezza d'oscillazione.

Raggiunta, per esempio, la superficie di separazione tra il terreno e l'opera in calcestruzzo o analogamente tra l'opera in calcestruzzo ed il terreno, nel caso di propagazione dell'onda esplosiva a partire da un pilastro minato, l'onda d'urto viene in parte riflessa ed in parte trasmessa alla struttura o terreno rispettivamente. Il grado di trasmissione dell'onda dipende dalla impedenza sismica  $Z$  dei due materiali pari a  $Z = \gamma \cdot c$  ( $\gamma$  densità del materiale e  $c$  velocità del suono nel materiale); se il secondo mezzo fosse per esempio l'aria la riflessione sarebbe totale.

Questo potrebbe accadere nel caso di giunto aperto senza riempimento, qualora il giunto avesse un'estensione tale da separare completamente la struttura dal terreno; in caso contrario, si avrà una certa trasmissione delle onde comunque nettamente ridotta.

Si sottolinea quindi che l'onda d'urto provocata da un'esplosione nel suo tragitto si attenua ulteriormente per via della non omogeneità del mezzo di trasmissione soprattutto passando da un terreno e l'altro.

L'areale di Barcis è caratterizzato perlopiù dalla presenza di Calcari dolomitici del Cretaceo superiore. In Figura 5 si noti che alla relativa omogeneità del facies (terreno verde) si abbinano modesti depositi lacustri (visibili in giallo) (cfr. *Relazione geologica Dott. Enrico Arese – Elaborato ID-18-R-003 maggio 2018*).

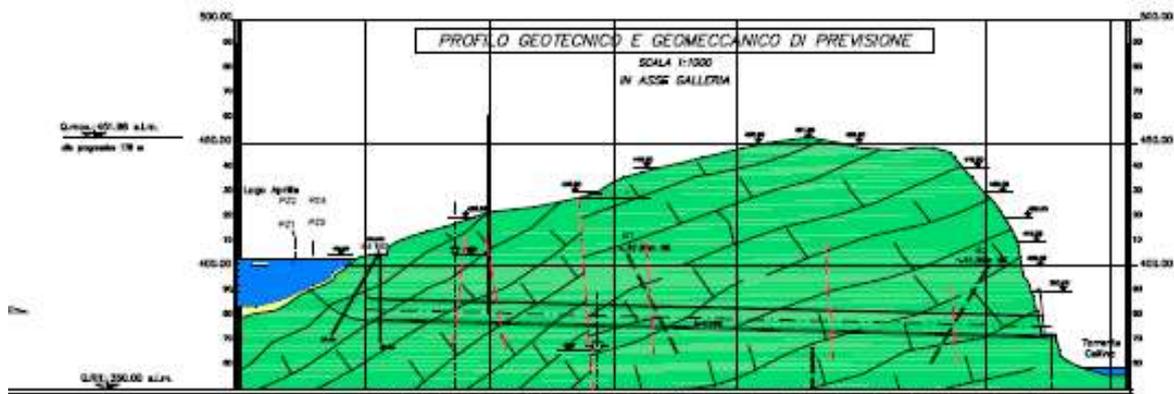


FIG. 5 – rappresentazione di massima della galleria rispetto al lago

Le rocce prevalenti hanno stratificazione complessa, sia in termini di giaciture che in termini di degradazione.



Fig. 6 – Affioramenti locali

Tali strati sono ben definiti, il che implica una discontinuità nel processo sedimentario caratterizzato quindi da alternanze di deposito a diverso grado di maturazione.

Sono inoltre presenti evidenti segni di estesi fenomeni carsici.

Tutto ciò si traduce in una naturale e fisiologica attenuazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche (vibrazioni).

Pertanto, ad un supposto valore elevato di velocità in caso di roccia isomorfa, viene a trovarsi invece utilizzabile un valore di velocità di propagazione anche dell'ordine del 30% del valore nominale suggerito dalla tabella sottostante.

Un calcare dolomitico fessurato come quello in esame può considerarsi attraversato da velocità ben inferiori ai 2000 m/s.

MATERIALE ATTRAVERSATO	VELOCITA' DI PROPAGAZIONE	COEFF. K (orient)
Strato areato superficiale	300 - 800 m/s	0-50
Sabbia asciutta	500 - 1000 m/s	50-100
Sabbia umida	600 - 1800 m/s	100-150
Acqua (valore medio)	1500 m/s	100-150
Calcare	3500 - 5000 m/s	200-400
Arenaria	2500 - 4500 m/s	150-350
Granito	4000 - 6000 m/s	250-400
Sale (duomo salino)	4500 - 6500 m/s	300-400
Dolomia	5000 - 6000 m/s	350-400
Rocce metamorfiche	3000 - 7000 m/s	300-400

*Tabella orientata sui valori di velocità di propagazione delle onde e sui valori di "k" considerando di attraversare terreni compatti e privi di qualsiasi discontinuità*

*Fig. 7 -- Tabella tratta da Manuale Pratico di Esplosivistica Civile . D.Coppe 2014*

Altra discriminante "locale" di cui tenere conto saranno le quote di lavoro rispetto all'invaso.

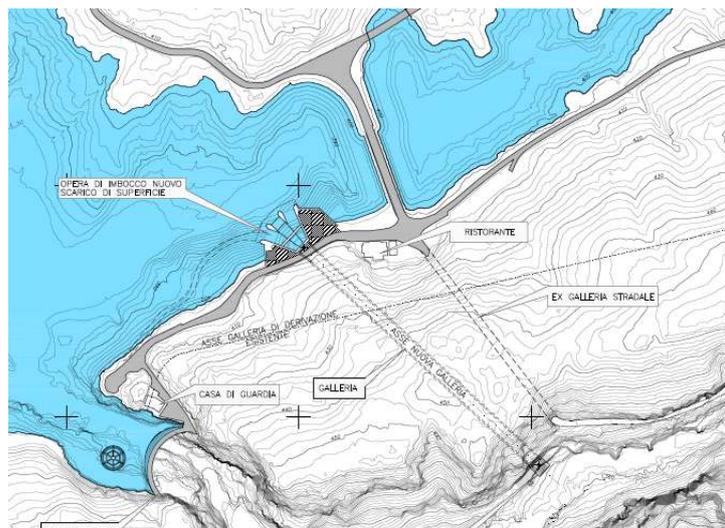


FIG.8 – le opere in pianta

A complicare le cose, la velocità di propagazione e l'entità dell'attenuazione con la distanza sono in generale diverse per le vibrazioni longitudinali e trasversali, ed anche la frequenza può modificarsi lungo il percorso. Tuttavia, all'atto di rilevare il fenomeno quale si presenta in un punto di arrivo prescelto, è possibile ottenere una descrizione completa registrando l'andamento nel tempo degli spostamenti del punto stesso in tre direzioni. L'onda di vibrazione è quindi scomponibile in tre diverse componenti, nel punto di rilevamento, secondo le tre direzioni  $x$  (longitudinale),  $y$  (trasversale),  $z$  (verticale). A volte però si effettua la registrazione di una oppure di due sole componenti; questo è giustificabile col fatto che le caratteristiche principali delle tre componenti sono spesso per ordine di grandezza tra loro compatibili.

Il fenomeno della vibrazione dipende da un lato dal meccanismo dell'esplosione e del collasso del materiale escavato, dall'altro dalle caratteristiche fisiche del terreno sia in corrispondenza del punto di esplosione, sia lungo il percorso delle varie onde e sia nella zona di osservazione (in questo caso il pesce).

È difficile dedurre per via teorica, in modo preciso, le caratteristiche delle vibrazioni prodotte da una data esplosione in un determinato ambiente. Infatti, non può essere stabilita la percentuale dell'energia totale liberata che si trasforma in energia di onde elastiche dei vari tipi. Inoltre, le proprietà fisiche, in particolare quelle elastiche, dei terreni sono in genere variabili e la loro distribuzione spaziale così come il loro effettivo valore sono spesso incerti. Infine le leggi della propagazione ondosa sono difficilmente applicabili ad un mezzo elasticamente complesso quale è il sottosuolo.

Lo studio delle vibrazioni, inteso per esempio ad ottenere relazioni generali tra i vari parametri, è pertanto condotto essenzialmente su basi sperimentali. Ecco perché è prassi utilizzare sempre parametri peggiorativi.

Ai nostri fini la vibrazione d'interesse sarà caratterizzata da due soli valori numerici caratteristici, o parametri, quali:

- la velocità massima riscontrata nel movimento vibratorio, indicata come velocità particellare massima o "Peak Particle Velocity" (P.P.V.).
- il periodo principale  $T$ , dato dalla durata di una oscillazione completa, oppure la frequenza dominante, data dal numero di ripetizioni dell'oscillazione in un secondo e pari all'inverso del periodo corrispondente.

Tale analisi permette di non considerare un terzo parametro d'onda che caratterizza le vibrazioni reali, cioè lo smorzamento, in quanto non serve ai fini di progetto e verifica di un'esplosione, conoscere l'andamento totale nel tempo dell'onda. Quindi seppur prevalente lo smorzamento dovuto ai passaggi di stato, ai fini cautelativi non verrà inizialmente tenuto conto.

### ***3.3 CALCOLO PREVISIONALE DELLA VIBRAZIONE INDOTTA DAL BRILLAMENTO DELLE CARICHE***

Il parametro che più efficacemente rappresenta e si correla all'energia generata da un intervento di demolizione di roccia, e quindi alla sollecitazione trasmessa al terreno, è ormai universalmente consolidato (tutte le normative esistenti considerano tale parametro come riferimento) nel valore di velocità di vibrazione  $V$ .

Questo parametro non va confuso con il valore della velocità di propagazione dell'onda sismica  $C$  che rappresenta la velocità con cui lo stato vibratorio si trasferisce dal punto di scoppio all'infinito.

La velocità a cui ci si riferisce ( $V$ ) è detta velocità particellare, ovvero la velocità con cui la singola particella di terreno vibra intorno alla sua posizione di riposo al passaggio del treno d'onda (con velocità  $C$ ).

Per le relazioni previsionali, analizzate nei due paragrafi successivi, per il caso di demolizioni, si consideri quanto segue.

I parametri che entrano in gioco nella definizione del piano di tiro sono la quantità d'esplosivo fatta brillare  $Q$ , il numero di tempi d'innescò e la geometria della volata, nel senso di collocazione dei fori rispetto alla struttura da tutelare.

Il parametro più importante riferentesi al mezzo di trasmissione (terreno) è indubbiamente la distanza tra il punto di immissione dell'energia e l'interfaccia terreno – lago (approssimativamente vengono considerati 50 m).

### **3.4 LEGGI EMPIRICHE PER LA VALUTAZIONE DELLA VIBRAZIONE INDOTTA DAL BRILLAMENTO DELLE CARICHE**

Attraverso studi teorici e verifiche sperimentali, si sono via via nel tempo definite molte relazioni che consentono di determinare i valori delle velocità di vibrazione generate dall'uso d'esplosivo.

Queste relazioni possono essere espresse nella forma:

$$v = k \cdot R^\alpha \cdot Q^\beta$$

dove:

**v** rappresenta il picco di velocità parcellare, ovvero “peak particle velocity” del punto sottoposto a misura (in mm/s);

**R** rappresenta la distanza tra il punto di misura ed il punto di scoppio (in m);

**Q** rappresenta la quantità di esplosivo massima “cooperante” (in kg);

$k$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  rappresentano delle costanti adimensionali in funzione della geometria della volata e del terreno.

Come massima carica cooperante è da intendersi la massima quantità d'esplosivo che viene fatta brillare contemporaneamente, in pratica la carica massima che è innescata con detonatori aventi lo stesso ritardo o microritardo.

La normativa dell'USBM (United States Bureau of Mines) considera, infatti, indipendenti gli effetti di due cariche la cui esplosione avviene con scarto temporale di almeno 9 ms e le normative europee usualmente considerano assenza di cooperazione per ritardi superiori ai

20 ms (i detonatori microritardati che si utilizzano nelle attività esplosivistiche controllate hanno un  $\Delta t$  di ritardo pari a 25-30 ms).

È doveroso fare una precisazione: è importante considerare i difetti costruttivi dei detonatori; la precisione di fabbricazione degli elementi di ritardo nei detonatori del tipo “millisecondo” è di circa 5-10 ms. Detonatori quindi apparentemente identici, perché con lo stesso ritardo, si azionano con uno scarto temporale. Esistono in letteratura (soprattutto nei testi riguardanti gli studi di Langefors) delle tabelle in cui vengono indicati i fattori di riduzione da applicare alla carica massima cooperante e causa dello scarto di tempo tra i diversi detonatori con lo stesso ritardo.

Langefors indica il seguente fattore di riduzione ( $r$ ), per la carica totale ( $Q_t$ ) in un medesimo intervallo, a causa dello scarto di tempo ( $\Delta t$ ) tra i diversi detonatori in interferenze scoordinate.

Il tempo di un periodo d'oscillazione viene indicato con  $\tau$ .

f Hz	$\tau$ ms	r				
		$\Delta t \pm 5$	$\Delta t \pm 10$	$\Delta t \pm 25$	$\Delta t \pm 100$	$\Delta t \pm 200$
5	200	1	1	1	1/2	1/3
10	100	1	1	1	1/3	1/6
20	50	1	1	1/2	1/6	1/6
50	20	1	1/2	1/3	1/6	1/12
100	10	1/2	1/3	1/6	1/12	1/25
200	5	1/3	1/6	1/6	1/25	1/50
500	2	1/6	1/6	1/12	1/50	1/100

Fig. 9 - Tabella del ritardo fra tempi uguali di innesco (da "Rock blasting", Langefors U. Kihlström B., 1967).

Di conseguenza, nel brillamento di più cariche innescate nel medesimo intervallo, la carica in realtà cooperante può essere considerata inferiore alla carica massima del medesimo intervallo, ma comunque non dovrà essere considerata una quantità di carica inferiore al quantitativo massimo delle singole cariche.

In un'analisi previsionale è quindi opportuno considerare  $Q$  pari alla quantità massima di esplosivo che detona contemporaneamente.

Fatte tali precisazioni, possiamo ritornare alla relazione introdotta, in genere utilizzata nella forma seguente:

$$v = k \cdot \left(\frac{R}{Q^n}\right)^{-m} \quad (1)$$

dove il rapporto  $R/Q^n$  è chiamato “scaled distance” ovvero distanza scalata o ridotta. Dall’esperienza si evince che per situazioni in cui la distanza tra la volata e punto di indagine sia inferiore a 6 m è più conservativo adottare nell’espressione della distanza scalata il rapporto  $R/Q^{1/3}$  mentre per distanze superiori ai 31 m e per le cariche cilindriche è più conservativo il rapporto  $R/Q^{1/2}$ .

Nella pratica mineraria usuale (tali studi sono condotti relativamente all’uso d’esplosivo in cave) le distanze tra strutture da tutelare e volata non saranno mai inferiori ai 6 m e perciò in tale contesto la distanza scalata viene utilizzata con l’esponente  $n = 1/2$ .

Partendo dalla relazione base, ogni Paese ne ha poi ottenuto formulazioni differenti e generali in base alle prove fatte e quindi ai terreni locali e geometrie differenti di volata. Tali relazioni si elencano a seguito:

USBM (United States Bureau of Mines):

$$v = k \cdot \left(\frac{R}{\sqrt{Q}}\right)^{-B}$$

Si assume che le cariche utilizzate abbiano forma cilindrica. I parametri non noti caratterizzano il sito.

AMHEN (Ambraseys-Hhendron):

$$v = k \cdot \left(\frac{R}{\sqrt[3]{Q}}\right)^{-B}$$

Si assume che le cariche utilizzate abbiano forma sferica. I parametri caratterizzano il sito.

LANKH (Langefors-Kihlstrom):

$$v = k \cdot \left(\frac{R^{3/2}}{\sqrt{Q}}\right)^{-B}$$

I parametri non noti caratterizzano il sito.

SI (Indian Standard Institution):

$$v = k \cdot \left( \frac{Q}{R^{2/3}} \right)^B$$

I parametri non noti caratterizzano il sito.

CMRI (Central Mining Research Institute):

$$v = k \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-1} + n$$

Il valore  $n$ , parametro relativo alle proprietà del terreno, assume sempre valore negativo.

Per avere dunque picchi di velocità maggiori di zero si avrà che tale formula potrà essere applicata solo per  $R < \frac{k \cdot \sqrt{Q}}{n}$ .

Il parametro  $k$  caratterizza la volata.

Una buona metodologia di analisi consiste nella determinazione dei parametri delle varie leggi proposte e nella scelta successiva della legge che meglio determina i valori delle velocità rispetto a quelle misurate. Sgomberando subito i dubbi derivanti dal precedente elenco, la formula più cautelativa risulta quella di Langefors. La formula più “permissiva” è quella dell’U.S.B.M. L’elenco è stato posto nella presente relazione, per far vedere come tutti gli studi fatti hanno parecchi parametri in comune.

Per determinare i parametri di sito incogniti possono essere eseguite prove di sparo sperimentali nel terreno tra il punto di brillamento e quello da tutelare al fine di poter procedere alla compilazione di un diagramma che correli la velocità di vibrazione con la distanza scalata secondo le relazioni proposte. Si riportano, cioè, in un grafico logaritmico i valori delle velocità misurate in funzione della distanza scalata, nota, ricavando graficamente sulla linea di interpolazione i coefficienti incogniti.

In questo modo si trova la legge del sito in esame, cioè come si attenuano in quel particolare terreno le vibrazioni prodotte dal brillamento.

A causa di una legislazione nazionale farraginosa è difficile pensare di poter operare nei pressi per condurre delle prove di sparo atte a determinare la legge del sito.

È pratica quindi comune ai progettisti di tiro utilizzare, per una previsione dei picchi di velocità indotti dall'esplosione, la relazione di Langefors e Kihlstrom nella forma:

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{Q}{R^2}}$$

dove:

$k$  dipende essenzialmente dalle caratteristiche del mezzo di trasmissione e può assumere valori compresi tra 0 (terreni incoerenti) e 400 (rocce). Il valore 0 è il minimo ideale ad indicare un materiale che non trasmette alcuna perturbazione ed in genere non utilizzato. In letteratura esistono tabulati dei valori orientativi di tale coefficiente in base alla velocità di propagazione dell'onda nel materiale attraversato. La Figura 7 precedente ne è un esempio funzionale.

In base ad una stratigrafia del terreno sarà possibile caratterizzare il terreno e scegliere un valore opportuno del coefficiente. In tale operazione di scelta entra in gioco anche l'esperienza del progettista.

A conclusione del Capitolo posso affermare che la Formula di Langefors e Kihlstrom è stata usata dallo scrivente in centinaia di operazioni riscontrandone l'affidabilità.

Il più delle volte il valore previsto è risultato superiore a quello verificato strumentalmente. Ciò è dovuto in gran parte alla scelta di coefficienti  $K$  cautelativi considerando i terreni più omogenei di quanto siano in realtà.

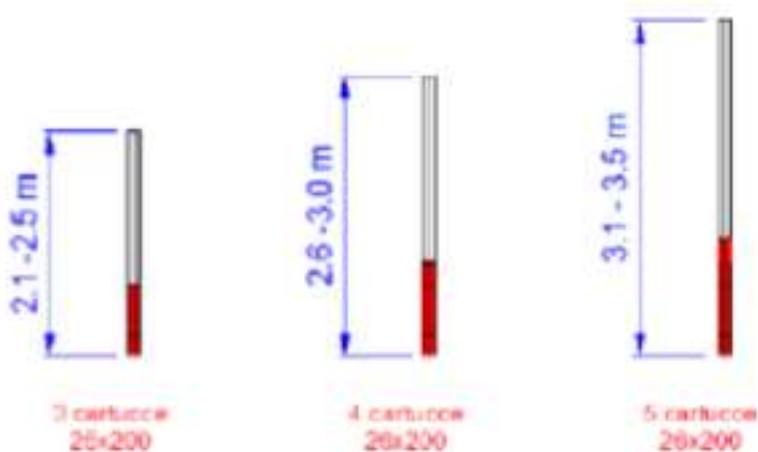
Al passaggio infatti attraverso dislivelli, cavità, fessure e diversi strati di roccia, avviene, come ampiamente detto, una formazione di onde di riflesso che provoca uno smorzamento del grado di oscillazione ( $v$ ). Anche per questa ragione le onde d'urto possono presentare a grande profondità una maggiore velocità di propagazione che non le onde d'urto che si diffondono sulla superficie della roccia (o in questo caso in acque poco profonde).

Grazie a queste formule è sempre possibile prevedere la vibrazione indotta da una volata.

## 4 GLI SCAVI DI BARCIS

Fatta tutta questa premessa riguardante i criteri di valutazione delle vibrazioni e delle normative pertinenti, ho preso a riferimento la descrizione di un piano di tiro redatti come indicazione di massima dai fornitori di esplosivo interpellati dalle imprese in gara per l'esecuzione dei lavori, nell'ambito del progetto di *Adeguamento idraulico della diga di Barcis*.

In particolare, è significativo quanto riportato negli schemi e tabella di pag. 16 e 27 sotto riportate



Schema	Sfondo	Numero mine	Carica totale esplosivo (kg)	Carica istantanea max Q (kg)	Consumo specifico (Kg/m <sup>3</sup> )
Sezione Tipo 1 1,50	1,5 metri	110	134,97	4,2	1,05
Sezione Tipo 1 2,00	2,0 metri	110	162,46	4,8	0,95
Sezione Tipo 1 3,00	3,0 metri	110	248,28	7,15	0,97
Sezione Tipo 1 4,50	4,5 metri	110	446,67	16,25	1,16

Da questa si estrapola che, nella peggiore delle ipotesi previste per lo scavo di sbancamento circa 1 kg mentre per lo scavo della galleria si possono raggiungere al massimo i **16.25** kg di esplosivo per intervallo.

Applicando comunque le formule di Langefors , pag. 20 e ponendo

$d = 50$  metri

$q = 16.25$  kg

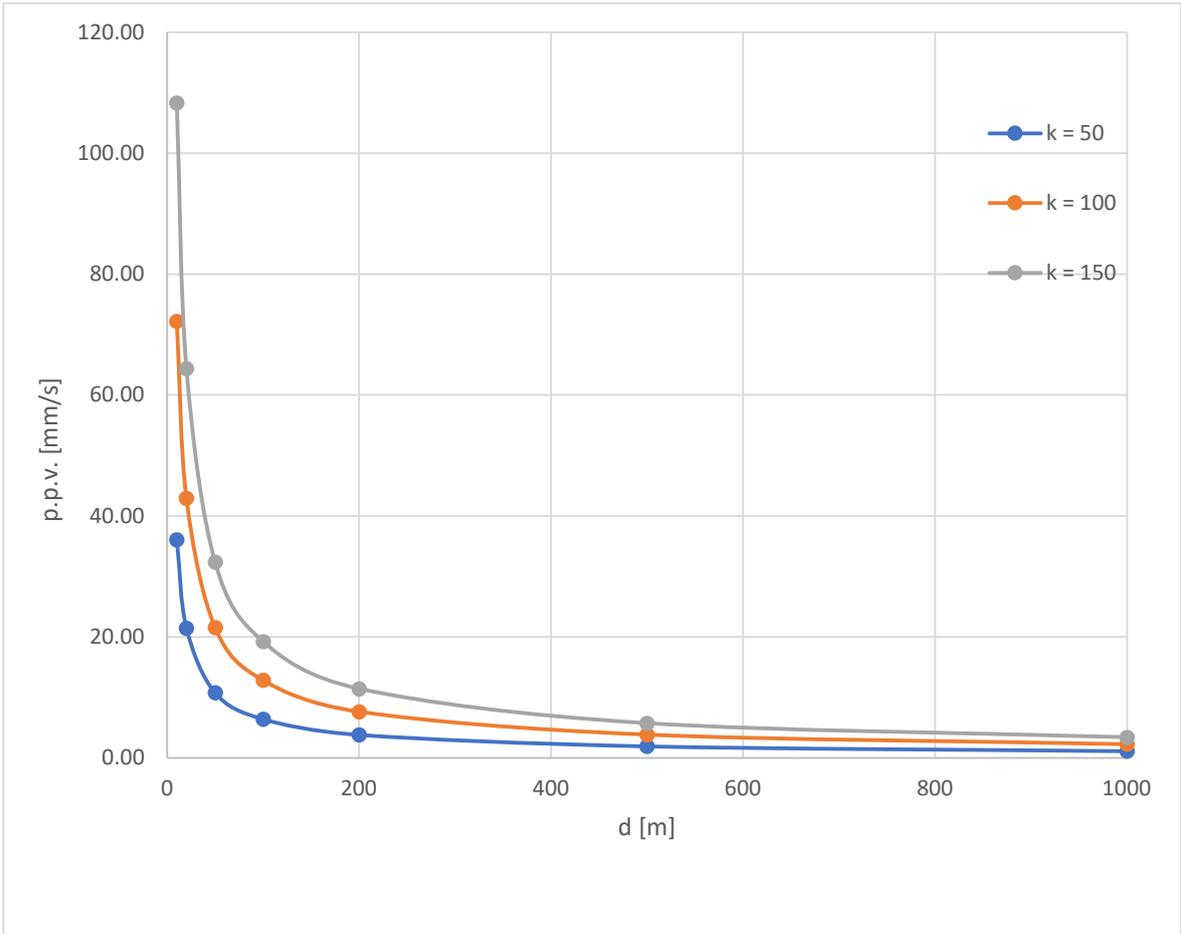
dove  $d$  è la distanza minima tra esplosione e invaso.

Resta da stabilire  $K$ . Questo coefficiente si basa essenzialmente sulla velocità di propagazione delle onde, quindi del litotipo attraversato, ma non solo. Conta, come detto, anche la posizione delle cariche rispetto a quanto da preservare. Inoltre, il  $k$  teorico prevede fattori di riduzione in base alle superfici libere disponibili nonché fattori di riduzione per ogni “passaggio di mezzo attraversato”. Ogni fattore di riduzione porta ad una riduzione di almeno il 30% del valore ricavato.

Basandoci sul solo litotipo, consultando ad esempio la tabella in Fig.7 della presente relazione, si potrebbe attribuire a titolo cautelativo un valore di  $k=150$

Tuttavia, tale valore sarebbe sensato su un materiale compatto e isomorfo. Trattandosi di rocce stratificate e anche frammentate, oltre che dalla natura anche dalle pregresse attività estrattive, un valore sensato sarebbe comunque inferiore a 100. Per esperienza di che scrive, che ha registrato con propria strumentazione svariate centinaia di volate, difficilmente il calcolo inverso portava, con terreni simili, a  $k$  superiori a 50. Tuttavia, riportiamo una tabella con i valori di  $k$  di 50 – 100 e 150, alla distanza di 10 metri, 50 metri, 100 metri, 500 metri e 1000 metri. Tale tabella si riferisce al valore dell’onda sismica esclusivamente nella roccia, senza considerare alcun fattore di attenuazione.

d	v		
	k = 50	k = 100	k = 150
[m]	[mm/s]		
10	36.12	72.23	108.35
20	21.48	42.95	64.43
50	10.80	21.60	32.40
100	6.42	12.85	19.27
200	3.82	7.64	11.46
500	1.92	3.84	5.76
1000	1.14	2.28	3.43

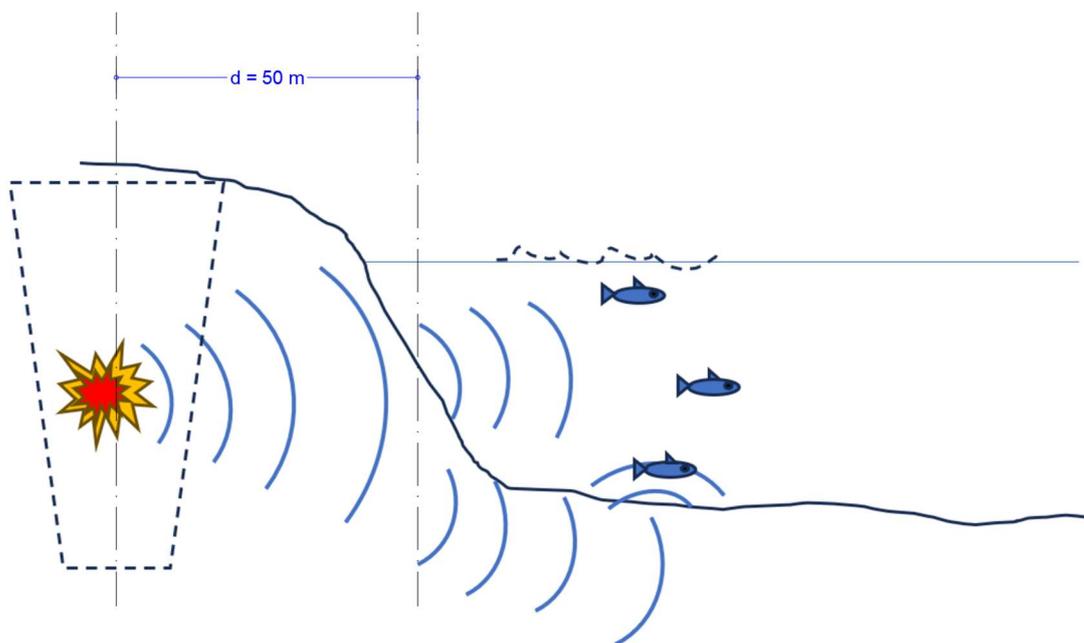


Vanno analizzati a questo punto i diversi percorsi delle onde sismiche.

Nel caso dello scavo, che è il punto che sarà più ravvicinato rispetto all'invaso, è sensato pensare a tre diverse componenti della sollecitazione vibratoria.

Una più superficiale, una mediana ed una di fondo.

Quella più superficiale è pressoché trascurabile in quanto le compressioni dell'acqua trovando il "pelo libero" della stessa, attraverso increspature dissiperanno subito l'energia.



*Fig. 14 -- rappresentazione grafica dei percorsi delle vibrazioni*

La componente mediana sarà quella diretta nell'acqua come fosse un altro litotipo. Smorzamento da cambio di stato a parte, l'acqua, secondo diverse fonti bibliografiche, può avere una velocità di propagazione delle onde, variabile da circa 1000 a 1500 m/s, come indicato nella tabella seguente.

Tab. 1.1. - Valori della densità, velocità del suono e resistenza acustica relativi ai materiali di uso più corrente

Materiale	c (m/s)	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_0 c \times 10^{-5}$ (rayl)	Materiale	c (m/s)	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_0 c \times 10^{-5}$ (rayl)
<i>Metalli</i>				<i>Legno nel senso della fibra:</i>			
Acciaio	5000	7800	390	Abete	4640	450	20,8
Alluminio	5100	2700	138	Acero	4110	670	27,8
Argento	2600	10500	270	Faggio	3340	750	25,0
Nikel	4970	8700	430	Frassino	4670	700	32,7
Oro	2000	19300	386	Olmo	4120	570	23,4
Ottone	3500	8400	295	Pino	3320	500	16,6
Piombo	1220	11400	138	Pioppo	4280	370	15,9
Platino	2650	21400	572	Quercia	3850	800	30,7
Rame	3560	8900	317	<i>Idem,</i>			
Stagno	2500	7300	182	trasversalmente			
Zinco	3700	7000	259	alla fibra:	valori ridotti ad 1/3		
<i>Non metalli</i>				<i>Liquidi</i>			
Ardesia	4500	3000	135	Acqua a 13°C	1441	1000	14,4
Avorio	3010	1800	54	Alcool	1240	800	9,9
Gomma	54	1000	0,54	Benzina	1166	900	10,5
Granito	3950	2700	107	<i>Gas:</i>			
Marmo	3810	2700	103	Aria a 0°C	331	1,30	$4,27 \times 10^{-3}$
Mattone	3650	1800	66	Aria a 15°C	341	1,21	$4,11 \times 10^{-3}$
Sughero	500	240	1,2	Azoto	336	1,25	$4,2 \times 10^{-3}$
Vetro	5500	2600	142	Idrogeno	1269	0,09	$1,1 \times 10^{-3}$
				Ossigeno	317	1,43	$4,5 \times 10^{-3}$

Fig 15 – Tratto da “Inquinamento da rumore – Maggioli Editore 1989

Velocità simili sono assimilabili all’attraversamento di sabbie umide o arenarie poco cementate.

La componente vibratoria che resta nell’ammasso roccioso produrrà una vibrazione sul fondale. Questa genererà una sovrappressione ulteriore in acqua regolamentata dalle seguenti regole fisiche:

$$p[kPa] = 2.500 \cdot \left( \frac{d}{q^{1/3}} \right)^{-1.13}$$

A questo valore, è necessario aggiungere il valore derivante dalle vibrazioni dovute al brillamento:

$$p[\text{kPa}] = 19.700 \cdot \left(\frac{d}{q^{1/3}}\right)^{-1.9}$$

Dall'applicazione delle suddette formule, si ottiene la tabella seguente:

d	p <sub>brillamento</sub>	p <sub>vibrazioni</sub>	Σ p
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
10	532.75	1'463.99	1'996.75
20	243.42	392.27	635.69
50	86.43	68.79	155.22
100	39.49	18.43	57.92
200	18.05	4.94	22.98
500	6.41	0.87	7.27
1000	2.93	0.23	3.16

Fig 16 – Tabella pressione in funzione della distanza

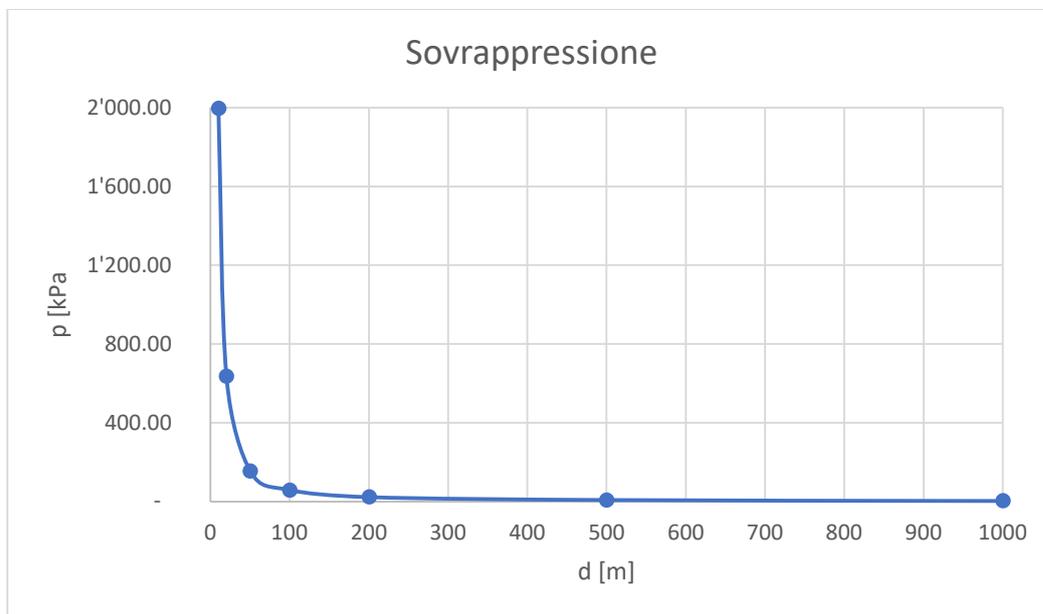


Fig 17 – rappresentazione grafica della pressione in funzione della distanza

È facile rendersi conto di come il valore della pressione precipiti nel giro delle decine di metri.

La pressione è legata alla velocità di picco dalla formula:

$$p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Da cui si ottiene che la  $v$  è funzione della pressione attraverso la densità del liquido.

La  $v$  che si ottiene alle varie distanze è:

<b>d</b>	<b>p<sub>brillamento</sub></b>	<b>p<sub>vibrazioni</sub></b>	<b>Σ p</b>	<b>v</b>
[m]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[mm/s]
10	532.75	1'463.99	1'996.75	20.180
20	243.42	392.27	635.69	11.387
50	86.43	68.79	155.22	5.627
100	39.49	18.43	57.92	3.437
200	18.05	4.94	22.98	2.165
500	6.41	0.87	7.27	1.218
1000	2.93	0.23	3.16	0.803

*Fig 18 – con velocità di oscillazione della particella*

Come si evince facilmente dalla tabella, la vibrazione a 50 m è inferiore a 6 mm/s.

A tale proposito, si significa che il limite massimo per gli edifici e le costruzioni in generale è pari a 10 mm/s, per cui il valore – senza tenere conto di alcun fattore di attenuazione! – è inferiore al limite di normativa.

## 5 CONCLUSIONI

Chi scrive non è in grado di stabilire la soglia di disturbo per ognuno degli organismi subacquei presenti nel lago di Barcis.

Se si dovesse raffrontare il disturbo vibratorio ai fini della salvaguardia umana, è evidente che con i valori in atto NON ci sarebbero pericoli.

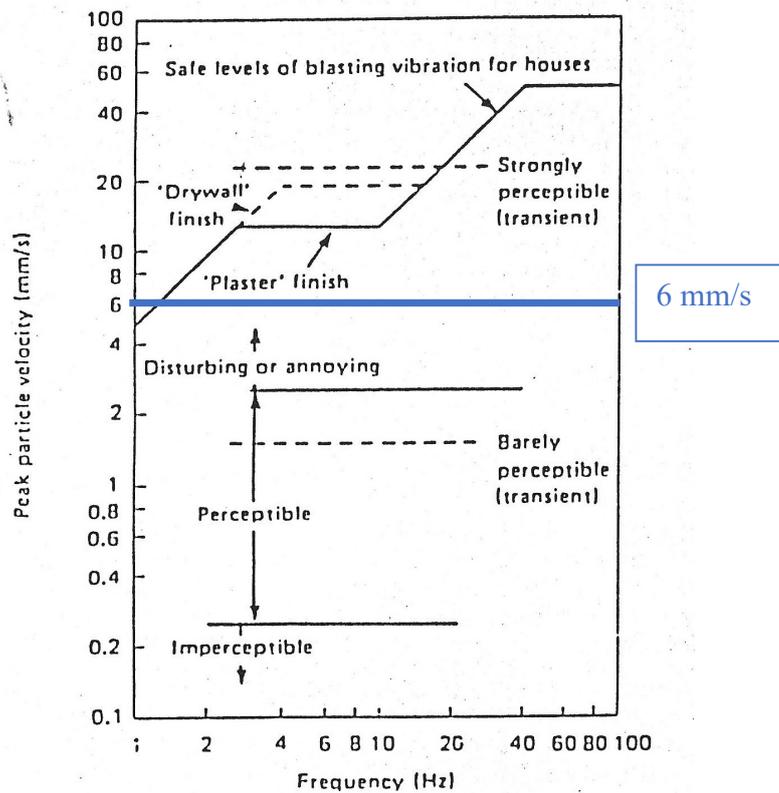


Fig.2 Safe blasting and human perception vibration thresholds

REIHER and MEISTER (1931)

Fig 20 – Valori di disturbo umano

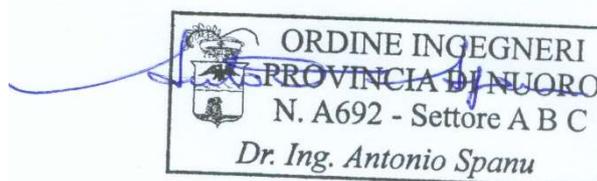
La più recente Normativa UNI 9614 legata al danno biologico alle persone, pone a circa 1 mm/s la soglia di danno per le Vibrazioni all'uomo se ripetute costantemente (e non è questo il caso!).

Sempre considerando i fattori di riduzione, i valori di vibrazione decadono completamente ai 100 metri di distanza (vedi diagramma in Fig.17)

Parma, 11 gennaio 2024

Dott. Danilo Coppe  
Geominerario Esplosivista

Ing. Antonio Spanu  
Ingegnere Progettista



**Dott. DANILO COPPE** *Geotecnico Minerario Esplosivista. Esperto di blasting engineering* con oltre 750 interventi di esplosivistica civile documentati. Laurea anche in Scienze Criminologiche e della Sicurezza. Fondatore e Progettista della SIAG srl di Parma, azienda italiana leader nelle Demolizioni con Esplosivi. Fondatore e Presidente dell'Istituto Ricerche Esplosivistiche. Professore a contratto nel Master di Analisi chimiche forensi per l'Università di Bologna. Docente dei Vigili del Fuoco nei corsi N.B.C.R.E., per l'Agenzia Industrie Difesa, per l'Aeronautica Militare, per il Centro Intelligence Interforze e per diversi Comandi Provinciali e Regionali dei Vigili del Fuoco per corsi di “*Esplosivistica Generale*” e “*Blast Investigation*”. Autore di oltre 50 pubblicazioni scientifiche sull'impiego degli esplosivi, pubblicate su riviste nazionali, internazionali e atti di convegni. Sette libri all'attivo: *Esplosivi nella lotta agli incendi boschivi*; *Manuale Pratico di Esplosivistica Civile tre edizioni*; *Building Vulnerability in relation to Terrorist Attacks with Explosives*; *Dynamite Stories*; *Identification Colours of Explosives & Blasting accessories*. Consulente e Ausiliario di Polizia Giudiziaria per le Istituzioni Pubbliche per questioni di esplosivistica, effetti delle esplosioni sull'ambiente, indagini, antisabotaggio e distruzione di materie esplodenti. Collaboratore dei Carabinieri del R.I.S. di Parma per indagini su esplosivi ed esplosioni. Collaboratore del G.I.S. di Livorno e del N.O.C.S. di Roma sui *metodi di irruzione con esplosivi in ambienti con ostaggi*. CTU per diverse Procure della Repubblica. Direttore di diversi Progetti di Ricerca in campo Antiterroristico con incarichi della Commissione Europea. Siti di riferimento: [www.esplosivi.it](http://www.esplosivi.it) [www.esplosivistica.it](http://www.esplosivistica.it)

**Ing. ANTONIO SPANU** *Ingegnere Civile – Idraulico. Esperto di Idraulica, Geotecnica e stabilizzazione e consolidamento terreni* con esperienza nella progettazione e esecuzione di lavori nelle Linee AC/AV Milano – Torino e Bologna – Firenze per conto di ITALFERR – Gruppo RFI. *Esplosivista. Esperto di blasting engineering*, ha frequentato il seminario sugli *Studi sulla vulnerabilità in merito agli attacchi terroristici con gli esplosivi (ABVERC)* e il seminario sull'*Identificazione degli accessori esplosivi. Esperto di esplosivistica applicata alla security*. Riconosciuto dal Ministero della Difesa come *Operatore al ricondizionamento e alla verifica dei colli di armamenti militari*.