

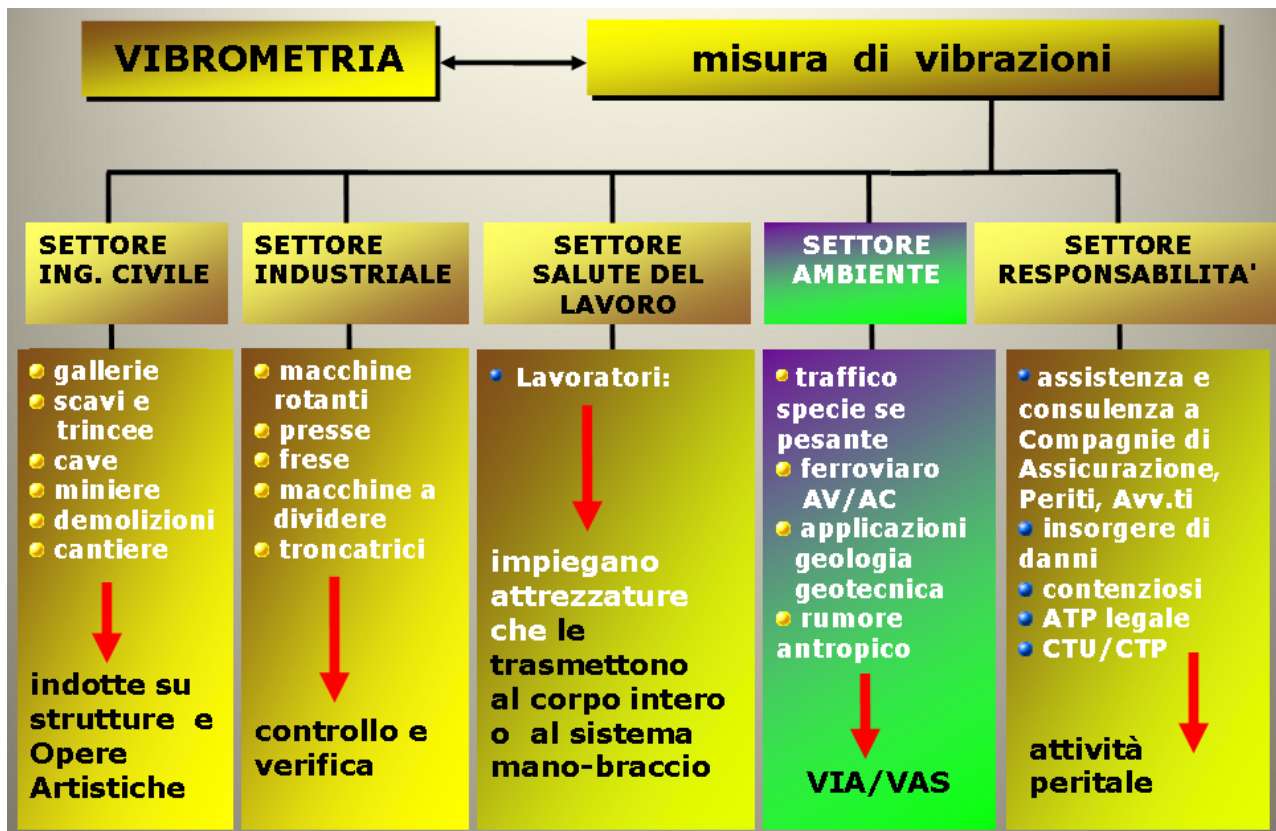
Rassegna tecnica del FVG

Le vibrazioni nei cantieri e nella progettazione

**Autori – Andrea Mocchiutti, Roberto Linari, Alessandro Pavan,
Davide Seravalli, Francesco Alessandrini**

La vibrometria è la tecnica che si occupa della misura, del controllo e del monitoraggio di vibrazioni.

L'ampia varietà dei campi di applicazione, che variano dall'ingegneria civile all'ingegneria industriale, coinvolgendo aspetti che vanno dalla geologia/geotecnica fino a tematiche riguardanti la salute sul posto di lavoro, rendono la vibrometria una realtà multidisciplinare in cui convergono gli interessi di diverse professioni: imprenditori, ingegneri progettisti, geologi, periti e avvocati.



Numerose sono le attività industriali o di cantiere che implicano sollecitazioni indotte su edifici, manufatti, strutture e, più in generale, sul territorio circostante. Le più comuni sorgenti di vibrazioni nel settore dell'ingegneria civile/industriale risultano essere:

- scavo di gallerie con impiego sia dei metodi tradizionali (esplosivo e demolitore idraulico) che di frese;
- scavo di trincee e lavorazioni correlate specifiche, sempre realizzate con utilizzo di esplosivo;
- scavi ed opere in sotterraneo;

- demolizioni controllate di edifici;
- attività dei cantieri edili con impiego delle relative attrezzature (camion e bilici);
- rulli compattatori, vibroinfissione di palancole, realizzazione di pali;
- macchinari industriali;
- traffico veicolare, specialmente quello pesante;
- traffico ferroviario:specie dei convogli AV/AC;
- rumore antropico;

Il rilievo assolve scopi assolutamente pratici al fine di conciliare l'operatività delle attività e la salvaguardia delle persone e delle cose, in quanto due sono i principali obiettivi:

- prevenire i danni che possono essere eventualmente provocati verso le strutture;
- evitare il fastidio delle persone, entro le strutture, per immissione di sollecitazione indotta derivante dalle attività sopra citate;

Il rilievo, durante le varie fasi di attività del cantiere, è volto in ultima analisi alla progettazione di metodi per la limitazione del fenomeno vibratorio, qualora questo presenti caratteristiche potenzialmente dannose per l'ambiente circostante.

Progettisti ingegneri, architetti, geometri, imprese, enti, compagnie di assicurazione e privati cittadini possono certamente essere interessati a:

- misure conoscitive: della propagazione elastica nel sottosuolo che dipende sempre,

- 1) dal tipo di sorgente che genera vibrazioni;
- 2) dalle caratteristiche geotecniche e strutturali di ogni zona;
- 3) dalla distanza tra la sorgente e l'eventuale punto interessato da vibrazioni indotte;

-misure preventive: rappresentano la migliore scelta di impiego del rilievo (ad es. per la pianificazione del traffico cittadino). Particolare attenzione, in questo ambito, va posta alle sorgenti con carattere continuo e non impulsivo (ad es. passaggio di autobus), in quanto tali vibrazioni possono indurre fenomeni di fatica nei materiali degli elementi principali delle strutture (travi, pilastri, solai, muri portanti). La fatica di un materiale si riscontra ogni volta che questo viene sottoposto a sforzi variabili ciclicamente nel tempo; se il numero dei cicli di ripetizione è sufficientemente alto, pur essendo il valore massimo degli sforzi molto minore di quello di snervamento o di rottura in condizioni statiche, si può verificare comunque la rottura (detta appunto rottura a fatica).

Le strutture più soggette a questo tipo di problematiche risultano essere quelle dei centri storici o, più in generale, le costruzioni del patrimonio artistico italiano che, data anche la vetustà di tali opere, presentano dei limiti di soglia inferiori rispetto a quelli fissati per le realizzazioni recenti con presenza di calcestruzzo e cemento armato.

-misure *di controllo*: nella modalità sia di misura giornaliera, sia di attività di monitoraggio prolungato nel tempo.

Le misure vibrometriche, atte alla valutazione dei parametri di velocità e frequenza (e in sub-ordine dell'accelerazione), vengono eseguite con materializzazione in campagna di profili di acquisizione che valutano le leggi di attenuazione dell'energia con la distanza (tra sorgente e punto di rilievo); tali espressioni (leggi di regressione) esprimono il comportamento della zona oggetto di indagine ed hanno valore di previsione del parametro velocità.

In campo vibrometrico, le frequenze di interesse potenzialmente dannose per gli edifici risultano comprese nell'intervallo dei 6-20 Hz, mentre per le persone fisiche tale intervallo si amplia tra 1 e 80 Hz.

Un esempio pratico di acquisizione dati in campagna è descritto qui di seguito e riguarda il cantiere di Risano (Ud), dove è stato effettuato un monitoraggio vibrometrico in prossimità degli edifici esistenti durante la fase di infissione delle palancole per la realizzazione di un sottopasso ferroviario.



Per l'esecuzione del rilievo è stato utilizzato il Minimate DS-077 della Instancel Inc.(Canada).

Lo strumento è equipaggiato con geofono triassiale e le caratteristiche tecniche principali sono:

- campionamento fino a 1024 sps (samples per second);
- campo di velocità fino a 127 mm/s e risoluzione di 0,125mm/s (intervallo di frequenza tra 2 e 250 Hz);
- logger in grado di memorizzare gli eventi.

La registrazione parte con opzioni da parte dell'operatore e per quanto riguarda il superamento di trigger, che la abilita, la soglia di quest'ultimo varia tra 0,25 a 127 mm/s, regolabile in step da 0,01 mm/s. L'elaborazione del dato raccolto in campagna avviene mediante apposito software Blastware10, per mezzo del quale è possibile confrontare i valori di vibrazione registrati con le

normative di diversi paesi, ed in particolare con la normativa tedesca DIN STANDARD 4150 (impiegata soprattutto per le vibrazioni di breve durata, impulsive), attualmente recepita in Italia.

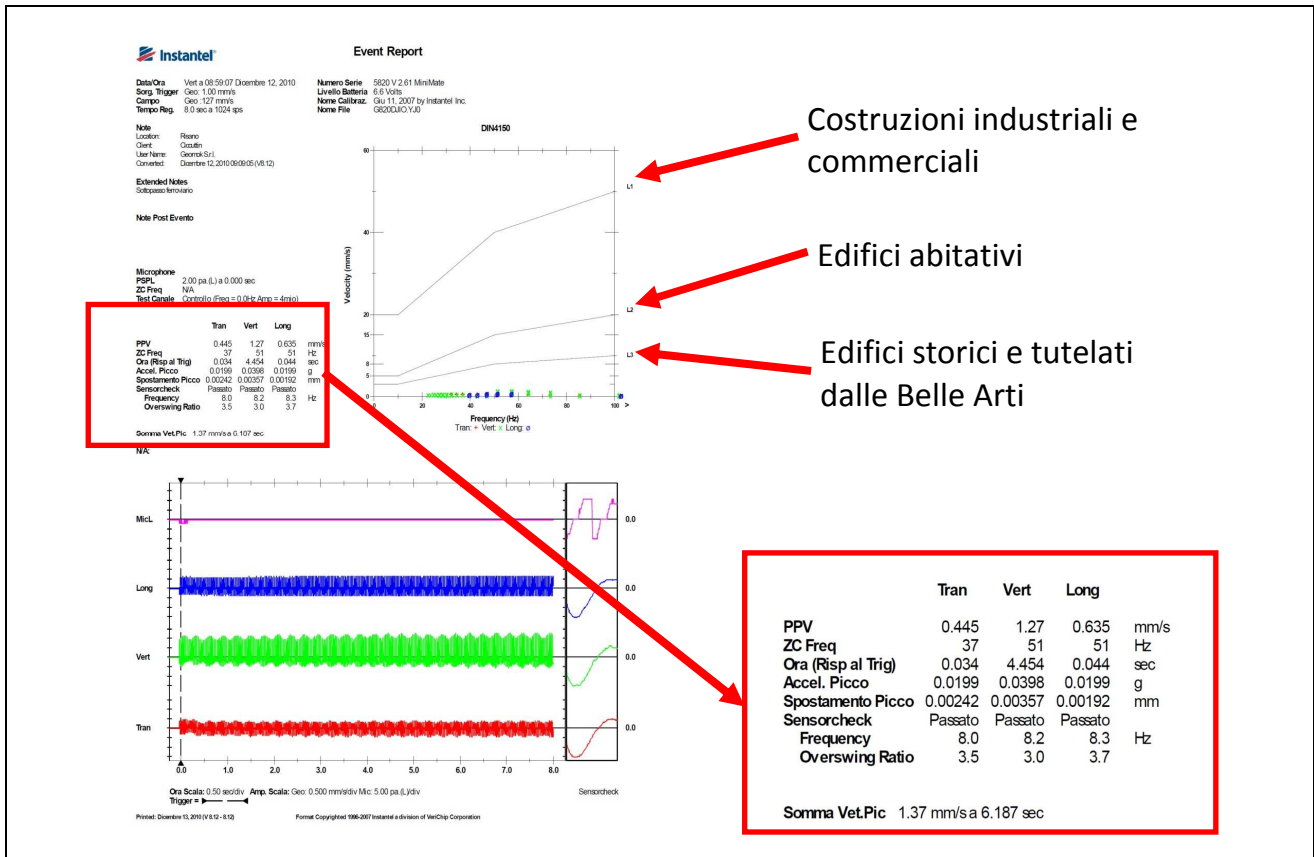


Minimate DS-077

La strumentazione posizionata vicino ad una sorgente che produce vibrazioni misura la velocità di vibrazione delle particelle di terreno o, nel caso di una struttura, la velocità di vibrazione che gli elementi strutturali subiscono per effetto dell'azione prodotta dalla sorgente. La normativa prevede la misura delle sollecitazioni secondo le tre direzioni (Verticale, Orizzontale Longitudinale e Orizzontale Trasversale) e, nel caso di sviluppo alla base della struttura, il geofono che misura la Componente Orizzontale Longitudinale va posizionato con direzione parallela al lato maggiore dell'edificio e verso in direzione della sorgente.

Quindi la strumentazione utilizzata permette di calcolare in maniera automatica la Risultante (modulo del vettore somma delle singole componenti) che rappresenta l'effetto complessivo delle vibrazioni indotte lungo i tre assi.

I criteri di misura e della valutazione degli effetti delle vibrazioni e i valori di soglia accettabili sono regolati da numerose normative UNI ed ISO che forniscono una guida per la scelta di metodi appropriati di misura e di trattamento dei dati. Nel cantiere oggetto di studio è stata tuttavia presa a riferimento la normativa DIN 4150 tedesca che definisce i valori di soglia a seconda degli edifici interessati dalle sollecitazioni indotte (costruzioni industriali e commerciali, edifici abitativi, edifici storici e tutelati dalle belle arti).



In ambito ingegneristico/geologico-tecnico, alla base della comprensione del fenomeno vibratorio vi è quindi innanzitutto la necessità di:

- 1-caratterizzare la sorgente di vibrazioni indotte (impulsiva o continua);
- 2-comprendere la struttura del sottosuolo (il mezzo attraverso cui la vibrazione si propaga) e la sua risposta indotta dall'azione della sorgente;
- 3-valutare la risposta della struttura che poggia sul sottosuolo, ovvero l'interazione suolo-struttura prendendo in considerazione condizioni, impiego e caratteristiche dei materiali, alla luce anche dell'età e della tipologia costruttiva.

Per quanto riguarda l'ultimo punto, uno strumento di particolare interesse per tali studi risulta essere la tecnica geofisica denominata HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio), la quale utilizza le vibrazioni naturali (non indotte) per determinare la frequenza di risonanza di sito.

Tale tecnica, sviluppata in Giappone a cavallo degli anni '70 del secolo scorso, consiste nella misura passiva di rumore sismico ambientale (microtremori), ovvero di oscillazioni continue di piccola ampiezza originate dalla sovrapposizione di effetti generati sia da sorgenti naturali (perturbazioni meteorologiche a larga scala, vento, onde oceaniche,...) che da sorgenti antropiche (traffico, attività industriali,...), sempre presenti nelle registrazioni.

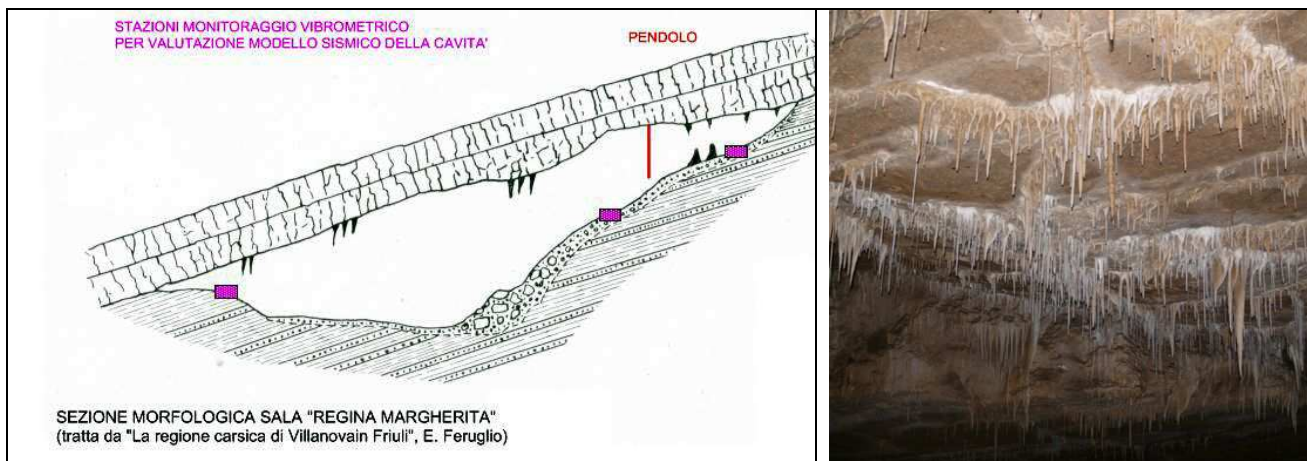
La possibilità di effettuare tali misure alla base dell'edificio e ai piani più alti permette di determinare le frequenze proprie sia del sottosuolo sia della struttura in esame, in modo tale da valutare la funzione di trasferimento dell'energia dal terreno all'edificio e lo smorzamento operato dalla struttura.

In fase di progetto, inoltre, la conoscenza della frequenza di risonanza del sito, permette di realizzare strutture con frequenze proprie che si discostano da quella di sito. Infatti, quando tale frequenza coincide con quella di costruzione dell'edificio, è possibile il verificarsi di una situazione di elevato fattore di rischio, ovvero l'instaurarsi del fenomeno prima di risonanza e poi di eventuale doppia risonanza. Se l'edificio risuona, l'ampiezza di reazione della struttura viene amplificata

raggiungendo il suo massimo e quanto più dura questo fenomeno, tanto più distruttivo è l'effetto (es. terremoto).

Verranno qui di seguito trattati alcuni casi in cui la vibrometria si pone come strumento indispensabile per la corretta riuscita delle attività di cantiere.

Il primo esempio pratico riguarda l'analisi delle problematiche relative all'utilizzo dell'esplosivo nello scavo in sotterraneo nel cantiere di Villanova delle Grotte (Ud), data la necessità di preservare intatti gli speleotemi del rinomato polo turistico. La decisione di realizzare infatti una galleria allo scopo di ampliare il percorso turistico già esistente ha costituito una sfida piuttosto difficoltosa. Le stalattiti, che per la loro particolare forma sono stati definiti "spaghetti" (lunghezza complessiva fino a 2m, diametro esterno costante tra i 5mm e 10mm e canale centrale continuo con diametro 2mm-6mm), sono state considerate le strutture maggiormente sensibili agli effetti indotti dalle sollecitazioni derivanti dall'attività di scavo mediante esplosivo. Non trovando in letteratura nessuna informazione che desse indicazioni sul valore di soglia (riguardo a velocità di vibrazione delle particelle e frequenze di risposta) potenzialmente dannoso per questi "spaghetti", è stato deciso di monitorare le vibrazioni che si trasmettono nella sala principale della grotta, la sala Margherita, dove la presenza di questi spaghetti risulta più numerosa.



Le misure iniziali delle vibrazioni provocate dalle esplosioni hanno permesso di comprendere che il segnale significativo nel terreno aveva una durata di circa 0,500s, con il massimo di velocità raggiunto nella fase iniziale e con una durata di circa 0,060s.

La ricerca del giusto compromesso tra velocità di avanzamento e mitigazione delle sollecitazioni indotte dallo scavo ha permesso di valutare le metodologie più opportune per l'abbattimento delle vibrazioni tra cui:

- diminuzione dello sfondo in avanzamento;
- scelta dell'esplosivo;
- variazione del diametro dei fori in volata;
- posizione e scelta dei detonatori;
- inserimento di un aiuto rinora;
- variazione dei ritardi nella rinora e aiuto rinora;
- diminuzione della quantità di esplosivo per ogni foro;
- cambio della tipologia di rinora;
- divisione della volata in due settori;

Il controllo e l'analisi dei dati ha consentito di usare l'esplosivo fino a 1 m di distanza dalla grotta.

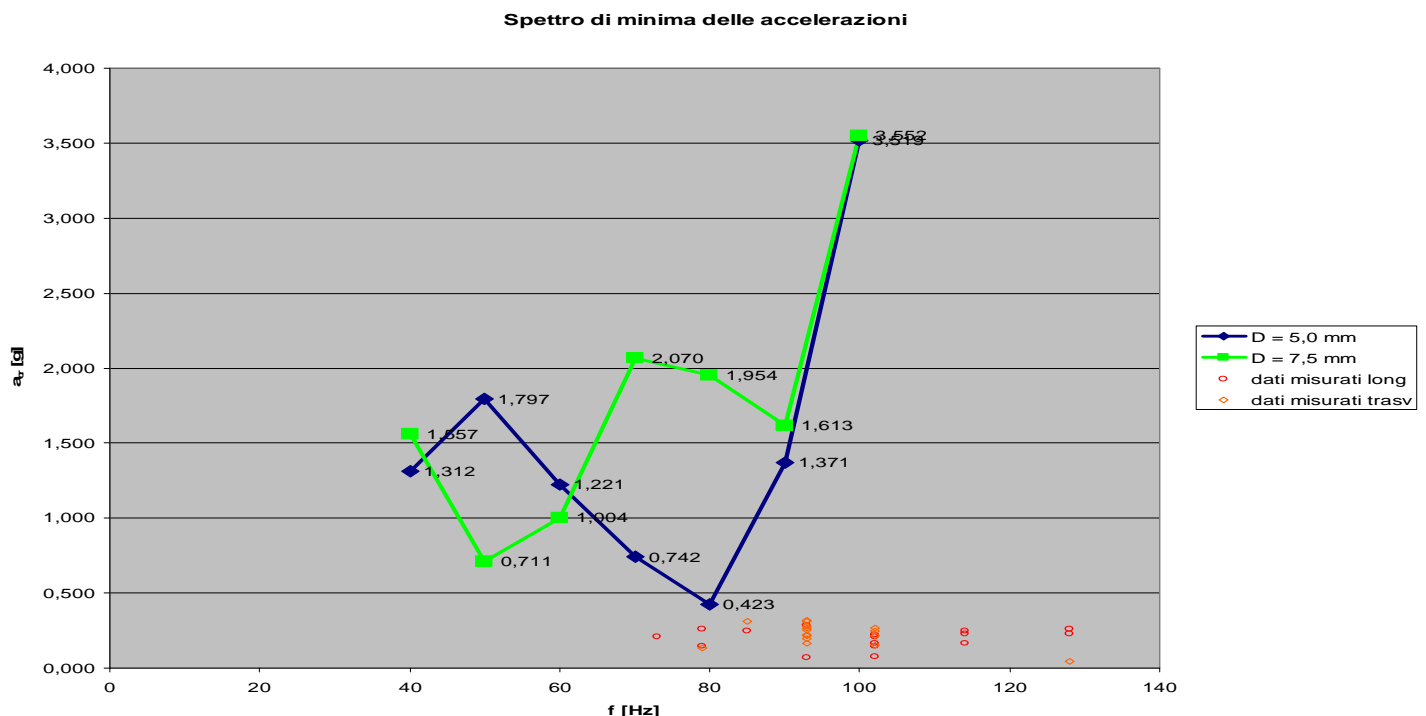
In parallelo è stato condotto dall'ing. Francesco Alessandrini uno studio volto alla modellazione degli spaghetti, per comprendere quale livello di accelerazione possa mettere in crisi queste strutture provocando in esse un momento flettente pari a quello di rottura. A tale scopo è stato ideato un modello FEM in cui gli spaghetti sono stati schematizzati con cilindretti verticali incastrati alla base, lunghi da 10cm a 100cm, del diametro esterno di 5mm e 7,5mm e spessore delle pareti di, rispettivamente, 0,75mm e 1,00mm. Sono stati utilizzati 2 tipi di forzanti:

- impulsivo a gradino (8 forzanti a durata variabile da 1/1000s a 600/1000s e accelerazione pari a 1 m/s^2);
- sinusoidale (7 forzanti a frequenza variabile da 40 a 100 Hz, della durata di circa 0,6s e accelerazione pari a 1 m/s^2);

L'analisi condotta è stata di tipo time-history lineare con sovrapposizione modale e ha portato ai seguenti risultati:

- caso per caso e in funzione delle frequenze proprie del singolo elemento e delle sue caratteristiche geometriche e meccaniche, si è determinata l'accelerazione che porta alla rottura flessionale e la frequenza relativa.
- sono stati estratti dei grafici che illustrano lo spettro delle accelerazioni che, a seconda della lunghezza dell'asta e della frequenza mettono in crisi lo spaghetti.

Sono stati costruiti quindi dei diagrammi che, in funzione della frequenza, forniscono l'accelerazione minima orizzontale che provoca la rottura di un qualche elemento tra quelli studiati. Nel grafico allegato potete vedere il riassunto conclusivo del lavoro con presentazione anche, in funzione delle frequenze da circa 75Hz a circa 130Hz, dei dati ricavati dalle misurazioni in grotta dopo la singola esplosione. Da essa si deduce come le accelerazioni relative alle frequenze attorno agli 80Hz siano potenzialmente le più pericolose per determinate dimensioni degli spaghetti analizzati.



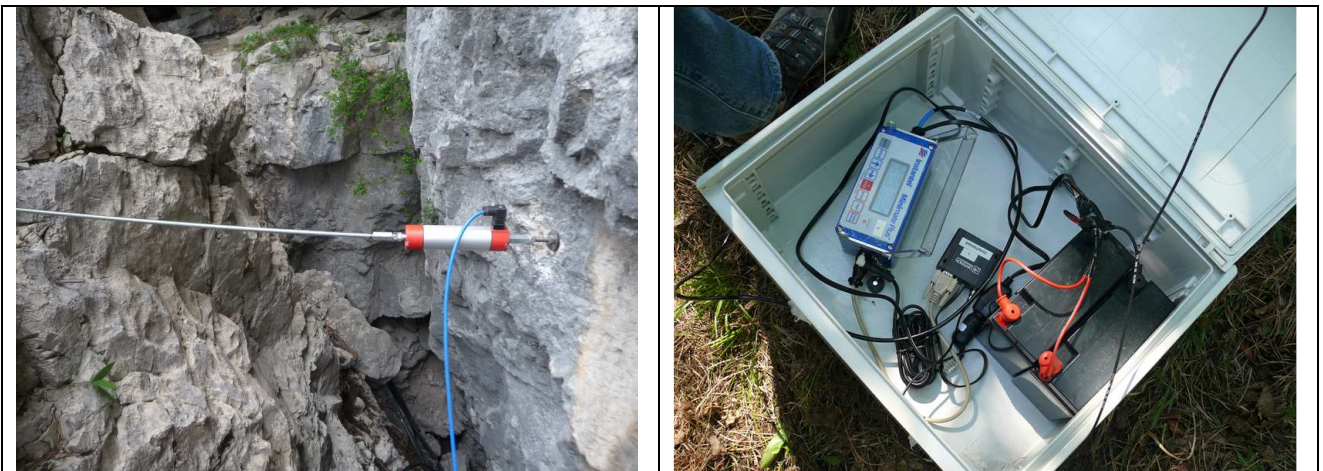
In ultima analisi viene illustrato il caso pratico riguardante la realizzazione della galleria stradale di Chiusaforte (Ud), con le problematiche inerenti al rischio di caduta massi dal versante dovuto alle vibrazioni per utilizzo di esplosivo in cantiere sulla SS13 Pontebbana.





A tale scopo è stato predisposto un sistema di monitoraggio costituito da:

- estensimetri in parete dotati di pannelli solari con trasmissione in remoto dei dati e sistema di chiusura automatica della strada statale;
- sismografi 3D lungo il profilo della galleria, posizionati costantemente lungo la verticale del fronte in avanzamento oltre ad una postazione fissa sulla verticale dei massi instabili, con alimentazione a batteria/pannelli solari e trasmissione in remoto dei dati;



Sulla base della bibliografia, delle condizioni della parete, di test eseguiti nel corso delle prime volate e dell'esperienza sono stati considerati i seguenti valori soglia di attenzione:

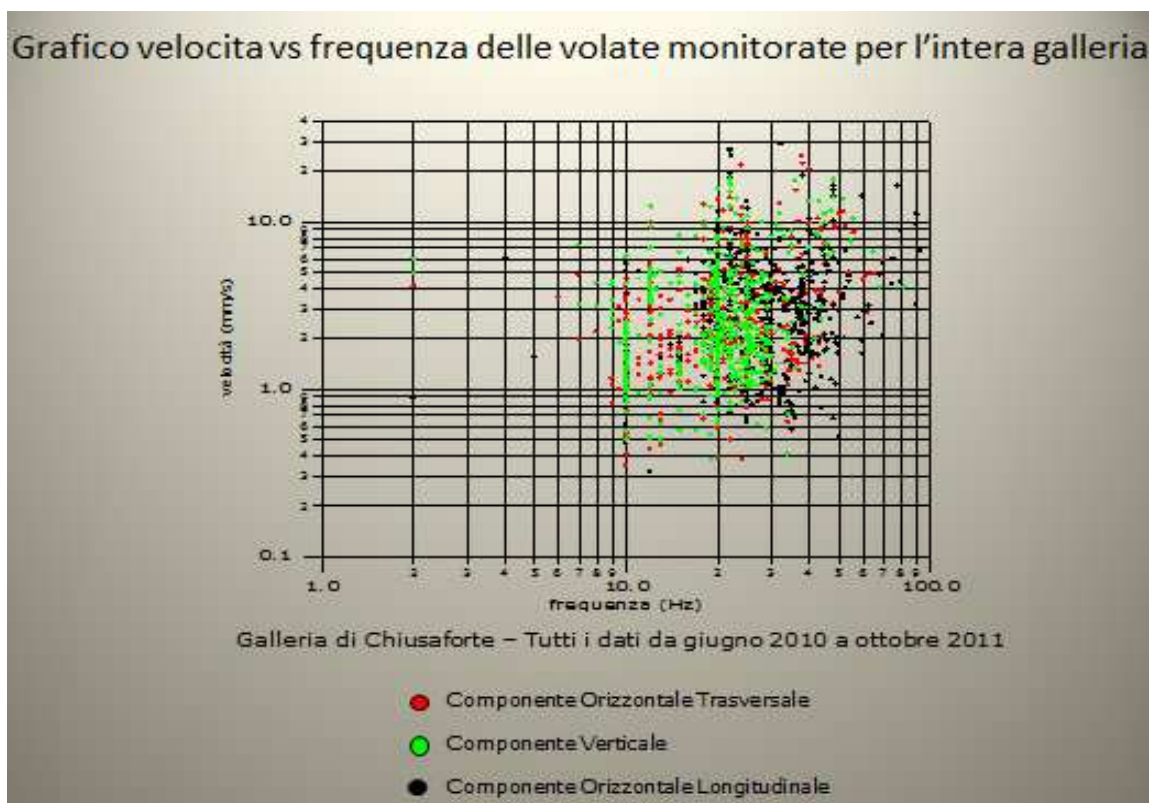
- Frequenze minori di 5Hz;
- Velocità particelle maggiori di 30 mm/sec;
- Accelerazioni maggiori di 0.25 g;
- Spostamento estensimetri maggiori di 5 mm;

Per la gestione della caduta massi da versante è risultato quindi importante tenere sotto controllo le frequenze ed in secondo luogo le velocità delle vibrazioni indotte.

Sul cantiere è stato eseguito un controllo continuo delle volate che sono state ottimizzate nel corso dei lavori al variare della condizione dell'ammasso roccioso riscontrato in galleria.

Il costante lavoro di calibrazione delle volate in galleria per ridurre le vibrazioni ha permesso di ottenere per il settore della parete con massi instabili i seguenti parametri:

- a) frequenze sempre maggiori di 10Hz
- b) velocità contenute nell'ambito dei 10 mm/sec (più frequentemente entro 2-3 mm/sec);
- c) sostanziale stabilità dei massi monitorati con estensimetri;



Alla luce di una richiesta sempre crescente di interventi legati a problematiche inerenti questo particolare settore, il 18 novembre 2011 si è svolto a Udine un convegno dal titolo “Le vibrazioni nei cantieri e nella progettazione”, organizzato dalla Geomok s.r.l.

In occasione di questo convegno è stato esposto lo stato dell'arte relativo alle conoscenze acquisite, attraverso l'analisi di diversi casi studio nei settori che riguardano le varie attività applicate dei cantieri edili grazie all'intervento di professionisti specializzati e operanti da diversi anni nel settore.

Relatori intervenuti al convegno e tematiche proposte

Roberto Linari

Campi di applicazione della misura delle vibrazioni.

Alessandro Pavan

Valutazione dei microtremori per le amplificazioni di sito e analisi sismica delle Vs30 per le NTC 2008.

Ivano Dell'Agnola

Utilizzo dell'esplosivo nello scavo in sotterraneo e mitigazione delle vibrazioni.

Gianfranco Macuglia

Problematiche nella costruzione di gallerie stradali.

Roberto Linari

Traffico veicolare e vibrazioni - vibrazioni indotte dall'uso dei rulli compressori nel cantiere stradale di Fiume Veneto.

Davide Seravalli

Metodologia e problematiche nell'infissione di palancole nel cantiere del sottopasso di Risano – analisi delle vibrazioni.

Francesco Alessandrini

La galleria turistica delle grotte di Villanova: difficile equilibrio tra vibrazioni e speleotemi.

Andrea Mocchiutti

Galleria stradale di Chiusaforte: rischio di caduta massi dal versante dovuto alle vibrazioni per utilizzo di esplosivo in cantiere.