

# Convegno EXPLO 2000 del 14 ottobre 2000 - Parma

*Titolo:*

---

## **Stabilità d'una scarpata in roccia: Confronto tra le sollecitazioni indotte da vari agenti destabilizzanti tra cui "onde sismiche per l'escavazione con esplosivi d'una galleria".**

*Autore:*

---

Dott. Ing. Roberto Folchi  
SEI – Società Esplosivi Industriali S.p.A, Ghedi (BS)

*Sommario:*

---

Nella presente memoria è riportata l'analisi per l'individuazione degli agenti destabilizzanti che hanno causato l'innesco di una frana in roccia.

Le sollecitazioni indotte dai seguenti fattori: "circolazione d'acqua meteorica", "accumulo d'acqua nei giunti al piede della scarpata", "gelo", "onde sismiche per terremoti, brillamento di esplosivi e traffico veicolare" sono calcolate e confrontate.

Come rilevanti, ai fini della stabilità, sono considerate le sollecitazioni indotte al piede della scarpata (equilibrio limite). L'analisi è consistita nella quantificazione dell'ampiezza delle sollecitazioni e della durata della loro azione destabilizzante.

Nella memoria è sintetizzato lo studio svolto per un caso specifico verificatosi ad Ascoli Piceno ma l'approccio metodologico è utilizzabile per casi analoghi.

*Testo:*

---

### **Introduzione.**

Alla fine di marzo da una scarpata si sono staccati circa 200 m<sup>3</sup> di roccia andando a danneggiare componenti strutturali di un fabbricato prospiciente (foto 1).

Questa frana si è innescata due giorni dopo la fine dei lavori di scavo di una sottostante galleria fognaria ovvero quando il fronte d'abbattimento si trovava alla distanza massima di 80 m. La galleria, che si sviluppa nella stessa formazione litoide dalla quale si è staccata la frana, passa ad una distanza minima di 40 m.

Alla frana è seguito un contenzioso giudiziario così che ha dovuto essere verificata la eventuale correlazione tra i lavori di scavo della galleria e l'infuosto evento.

### **Ammasso roccioso interessato dalla frana**

L'ammasso (unità "Arenacea") è costituito da arenaria in banchi con giunti stratigrafici a reggipoggio sul versante della scarpata franata. Localmente vi si rilevano intercalari, di potenza sino a 30 cm, di arenaria con lamine siltitiche (figura 1, foto 2 e 3).

Un intenso stato di fratturazione, diffuso a tutto l'ammasso, isola porzioni di roccia di dimensioni da 0.3 a 3 m.

In superficie giunti di frattura e giunti stratigrafici si presentano allentati e beanti (5÷10 mm di apertura), localmente riempiti da argilla e sabbia (foto 2, 3 e 4). In fase d'esecuzione della galleria è stato rilevato invece che, in profondità, i giunti si presentano ben serrati e l'ammasso compatto.

L'unità "Arenacea" è preceduta, in serie stratigrafica, da un'unità "Pelitico-Arenacea" costituita da strati sottili di argilla marnosa con intercalari arenaceo siltitici (figura 1).

### **Cinematismo di frana.**

La frana ha avuto innesco al piede della scarpata ed ha coinvolto, per scivolamento, volumi sovrastanti sino al ciglio. Alcuni blocchi sono invece rotolati andandosi a porre alla base del conoide di frana e contro il fabbricato.

Il conoide risultante era costituito da massi da cubici a piatti, di dimensione non superiore a 3 m ma generalmente inferiore a 0.5 m; la frazione fine (sabbia - ghiaia) era pari al 10% circa.

### **Stabilità della scarpata.**

Per l'analisi delle condizioni di stabilità della scarpata è stato fatto riferimento al modello dell'equilibrio limite.

La scarpata si mantiene in condizioni di equilibrio sino a quando le sollecitazioni agenti "SA" non superano in nessun punto dell'ammasso le massime sollecitazioni resistenti mobilitabili "SRM max" (figura 2).

Le SRM max sono costanti e dipendono, oltre ai parametri di resistenza caratteristici della roccia, dall'angolo d'attrito sulla potenziale superficie di scivolamento, sia essa un giunto o una nuova superficie di rottura.

Le SA consistono nel carico litostatico per i volumi di roccia sovrastanti più l'eventuale sovraccarico dovuto a manufatti sulla scarpata.

### **Fattori destabilizzanti.**

Quando alle sollecitazioni agenti se ne sommano altre per fattori, sia naturali che artificiali, con azione sia separata che congiunta, le SRM max possono essere superate con conseguente innesco della frana.

I seguenti fattori hanno agito con azione destabilizzante nella scarpata:

- erosione per dilavamento di frammenti di roccia al piede in seguito all'intensa circolazione d'acqua meteorica lungo la scarpata e nei giunti di frattura beanti;
- accumulo dell'acqua nei giunti al piede;
- formazione di ghiaccio nei giunti al piede;
- onde sismiche dovute ai terremoti, al brillamento delle mine per lo scavo della galleria ed al traffico veicolare pesante nella pista adiacente.

### **Erosione per intensa circolazione d'acqua meteorica.**

La scarpata prospiciente il fabbricato era priva di canale di gronda e durante le intense precipitazioni invernali, quali quelle registrate dall'ufficio meteorologico proprio prima ed in concomitanza dell'evento franoso, consistenti quantitativi d'acqua sono scorsi dal piano di ciglio sia lungo la scarpata sia nell'ammasso, attraverso il reticolo di fratture beanti (figura 3).

Un tale intenso flusso d'acqua ha provocato lo scalzamento dei frammenti fini di roccia tra i giunti al piede della scarpata. Questa azione è stata intensa negli intercalari arenaceo-siltitici, scarsamente coerenti, come confermato dai piccoli conoidi rilavati in vari punti al piede della scarpata.

I massi al piede della scarpata vedono ridursi progressivamente la base d'appoggio per l'erosione sino a quando questi, per il conseguente incremento delle sollecitazioni sulla superficie di scivolamento, si muovono sotto la spinta dei massi sovrastanti e danno inizio alla frana.

Ipotizzando al piede un carico litostatico di 3 m e la riduzione della base d'appoggio di 1/10 ne deriva un incremento della sollecitazione agente pari a 0.01 MPa:

PV (peso dell'unità di volume della formazione arenacea):  $2.2 \text{ t/m}^3$ ;

$\sigma$  (carico litostatico per 4 m di copertura):  $2.2 \text{ t/m}^3 * 3 \text{ m} = 6.6 \text{ t/m}^2 \cong 0.066 \text{ MPa}$ .

$\Delta\sigma'$  (sollecitazioni risultanti su una superficie ridotta di 1/10) =  $0.066 \text{ MPa} / 0.9 = 0.073 \text{ MPa}$ .

$\Delta\sigma$  (incremento delle sollecitazioni al piede della scarpata

per la riduzione di 1/10 delle superficie) =  $0.073 - 0.066 \cong 0.01 \text{ MPa}$ .

Le massime sollecitazioni che possono aver interessato l'ammasso roccioso per effetto del dilavamento con erosione al piede sono dunque pari a circa 0.01 MPa ed hanno esercitato un'azione destabilizzante irreversibile sui volumi di roccia al piede della scarpata.

Tale fattore è spesso di entità tale da portare all'innesco di una frana, anche facilitato dalla "lubrificazione" del giunto per il fango di dilavamento.

### **Infiltrazioni d'acqua con accumulo nei giunti di frattura beanti.**

Quando l'argilla ed i detriti trascinati per il dilavamento restano intrappolati entro le fratture al piede della scarpata si formano sacche ove l'acqua si accumula con un battente che può superare il metro.

La conseguente sollecitazione per la spinta idrostatica è massima al piede della scarpata e può raggiungere, in caso di battente pari ad un metro, sollecitazioni pari 0.01 MPa:

PV (peso dell'unità di volume dell'acqua):  $1 \text{ t/m}^3$

$\Delta\sigma$  (incremento delle sollecitazioni al piede della scarpata per un battente d'acqua di 1 m) =  
 $= 1 \text{ t/m}^3 * 1 \text{ m} = 1 \text{ t/m}^2 \cong 0.01 \text{ MPa}$ .

Le massime sollecitazioni che possono aver interessato l'ammasso roccioso per effetto delle infiltrazioni d'acqua nei giunti beanti al piede della scarpata sono state dunque pari a 0.01 MPa ed hanno esercitato un'azione destabilizzante reversibile per alcuni giorni.

### Gelo dell'acqua infiltrata nei giunti.

Quando la temperatura scende al di sotto dello zero l'acqua gela aumentando di volume. Se confinata in un volume chiuso, quale quello dei giunti nella roccia, nel passaggio dalla fase liquida alla fase solida l'acqua esercita una elevatissima pressione sulle superfici al contorno.

Dai dati del servizio meteorologico locale è stato rilevato che nei giorni immediatamente precedenti la frana la temperatura è scesa alcuni gradi al di sotto dello zero facendo così gelare l'acqua intrappolata nei giunti al piede della scarpata.

Per il calcolo delle sollecitazioni massime esercitabili dall'acqua in espansione a ghiaccio entro il giunto è stato ipotizzato un valore di E (modulo di elasticità della roccia componente l'unità Arenacea) pari a 15'000 MPa, (caratteristico di formazione arenacee con peso dell'unità di volume di 2.2 gr/cm<sup>3</sup>, modulo di Poisson 0.31, resistenza a compressione uniassiale 43 MPa [Lama R. D., Vutukuri V.S] ed è stata presa in considerazione una frattura con altezza "y" e larghezza "x" 500 volte superiori dello spessore "z": es. 1 m \* 1 m \* 2 mm:

$$VS \text{ (volume specifico acqua a } 0^\circ\text{C)} = 1.0002 \text{ cm}^3/\text{gr} = x*y*z$$

$$VS' \text{ (volume specifico ghiaccio a } 0^\circ\text{C)} = 1.0907 \text{ cm}^3/\text{gr}; = x'*y'*z' = (x+\Delta x)*(y+\Delta y)*(z+\Delta z)$$

$$x = y = 500 z;$$

in un mezzo omogeneo ed isotropo come l'acqua  $\Delta x/x = \Delta y/y = \Delta z/z \Rightarrow$

$$\Delta x = 500 \Delta z; \Delta y = 500 \Delta z$$

$$V \text{ (volume dell'acqua nella fessura)} = x * y * z = 500 z * 500 z * z = 250'000 z^3$$

$$V' \text{ (volume del ghiaccio nella fessura)} = (x + \Delta x) * (y + \Delta y) * (z + \Delta z) =$$

$$\Delta x/x = \Delta y/y = \Delta z/z$$

$$\Delta x/500 z = \Delta z/z$$

$$\Delta x = \Delta z/z * 500 z$$

$$\Delta x = 500 \Delta z$$

$$= (500 z + 500 \Delta z) * (500 z + 500 \Delta z) * (z + \Delta z) = 250'000 (z + \Delta z)^3$$

Poiché la massa resta uguale nel passaggio da acqua a ghiaccio:  $V / VS = V' / VS'$

$$250'000 z^3 / 1.0002 \text{ cm}^3/\text{gr} = 250'000 (z + \Delta z)^3 / 1.0907 \text{ cm}^3/\text{gr}$$

$$z^3 = 1.0002 / 1.0907 * (z + \Delta z)^3 = 0.9170 * (z + \Delta z)^3$$

$$(z^3)^{0.33} = (0.9170 * (z + \Delta z)^3)^{0.33}$$

$$z = (0.9170)^{0.33} * (z + \Delta z) = 0.9715 * (z + \Delta z) = 0.9715z + 0.9715 \Delta z$$

$$z - 0.9715z = z (1 - 0.9715) = 0.9715 \Delta z$$

$$\Delta z / z = (1 - 0.9715) / 0.9715 = 0.029 = \epsilon_z$$

La massima pressione teoricamente raggiungibile dall'acqua che ghiaccia, perfettamente confinata entro una fessura, è dunque pari a:

$$\sigma = E * \varepsilon_z = 15'000 \text{ MPa} * 0.029 \cong 400 \text{ MPa}.$$

Questo valore non può essere mai raggiunto poichè durante la formazione di ghiaccio intervengono fenomeni di rottura e di deformazione plastica, sia nella roccia all'intorno che nel ghiaccio di chiusura al contorno della frattura. Con approssimazione conservativa può essere considerato un valore pratico pari a un quarantesimo del valore teorico calcolato ovvero 10 MPa.

Quando la spinta del ghiaccio in formazione supera la resistenza allo scivolamento di un blocco parietale questo si mette in movimento per favorire l'espansione. Se permangono situazioni d'intrappolamento dell'acqua entro la frattura il fenomeno si ripete ad ogni successiva gelata e la massa rocciosa viene allentata sempre più sino a divenire instabile innescando la frana.

Tale fattore è spesso di entità tale da portare da solo all'innescamento di una frana.

### Le onde sismiche.

Le onde sismiche sono generate per il rapido rilascio di energia da una sorgente naturale, come nel caso dei terremoti, o artificiale, come nel caso di impatto al suolo di masse o di brillamento di cariche esplosive [Dowding H. C.].

I parametri caratteristici delle onde sismiche sono "C": velocità di propagazione dell'onda nel mezzo solido, "S": spostamento, "v": velocità, "A" accelerazione indotte nella generica particella elementare al passaggio del transiente ed "f" frequenza predominante dell'onda.

Le onde sismiche sono onde elastiche impulsive che si propagano nei solidi inducendovi un moto oscillatorio assimilabile a quello sinusoidale, così che i legami funzionali tra spostamento, velocità ed accelerazione possono essere assunti, in prima approssimazione, nei seguenti:

$$v = 2 * \pi * f * S;$$

$$A = 2 * \pi * f * v.$$

Le sollecitazioni associate al transiente sismico sono correlabili, in prima approssimazione ed a parità di frequenza predominante, alla velocità delle particelle "v" [Kolsky H.]:

$$\sigma = \rho * C * v$$

dove

$\rho$ : densità del mezzo di propagazione;

C: velocità di propagazione delle onde sismiche nel mezzo;

v: velocità d'oscillazione, al passaggio del transiente sismico, delle particella elementare di terreno intorno alla sua posizione di equilibrio.

### Onde sismiche che hanno interessato l'ammasso roccioso franato.

L'ammasso roccioso franato è stato interessato da onde sismiche generate da:

- terremoti;
- brillamento delle cariche esplosive utilizzate per le volate d'avanzamento in galleria;
- traffico veicolare pesante (mezzi d'opera) sulla pista adiacente.

### **Sollecitazioni associate alle onde sismiche indotte dai terremoti.**

Nel periodo immediatamente precedente la frana si è avuto risentimento di numerosi terremoti, come rilevato dai dati del Servizio Geofisico Nazionale. Solo nei due mesi precedenti nell'area sono stati registrati oltre 130 terremoti di Magnitudo compresa tra 1.1 e 3.5 e distanza epicentrale tra 20 e 120 km. Il terremoto di maggior ampiezza è stato quello del 5 marzo alle 00:45, con Magnitudo 3.5 e distanza epicentrale 50 km.

Per la stima dei valori dei parametri significativi delle onde sismiche indotte è stato fatto riferimento ai grafici riportati nelle figure 4 e 5 [Cherry S.]. In mancanza di dati relativi a sismi di intensità 3.5 è stato necessario estrapolarli mediante elaborazione statistica (tabella 1).

Il valore dell'accelerazione massima del terremoto è risultato pari a 0.00034 g. Dal grafico di figura 5 è stato invece ricavato un valore del periodo predominante del transiente sismico pari a 0.2 secondi (5 Hz).

Facendo riferimento alle relazioni tra parametri significativi del transiente sismico:

$A = 2 * \pi * f * v$  ed alla relazione tra velocità delle particelle, parametri geotecnici dell'ammasso e sollecitazioni indotte  $\sigma = \rho * C * v$  si ricava:

$$v = A / (2 * \pi * f) = (0.00034 \text{ g} * 9.81 \text{ m/s}^2) / (2 * 3.14159 * 5 \text{ s}^{-1}) = 1.06 * 10^{-4} \text{ m/s} = 0.106 \text{ mm/s}.$$

Con un peso di unità di volume dell'unità "Arenacea" pari a 2.2 t/m<sup>3</sup> e la velocità di propagazione delle onde logitudinali nell'ammasso pari a 3'800 m/s [Lama R. D., Vutukuri V.S.]:

$$\sigma = \rho * C * v = 2.2 \text{ t/m}^3 / (9.81 \text{ m/s}^2) * 3'800 \text{ m/s} * 1.06 * 10^{-4} \text{ m/s} = 0.09 \text{ t/m}^2 \cong 0.001 \text{ MPa}.$$

La massima sollecitazione che ha interessato l'ammasso roccioso arenaceo per effetto dei terremoti è stata dunque pari a 0.001 MPa, è durata una frazione di secondo e non ha portato effetti irreversibili. Le sollecitazioni possono essere considerate quasi-statiche per il basso valore della frequenza caratteristica del transiente sismico al quale sono associate.

### **Sollecitazioni per le onde sismiche indotte dal brillamento delle mine.**

La galleria fognaria è stata realizzata con la tecnica dell'abbattimento controllato con esplosivi. La roccia viene frantumata mediante cariche in fori da mina. Le varie cariche sono fatte brillare in successione, intervallate di millisecondi per minimizzare le vibrazioni indotte.

La massima carica ammessa a brillare istantaneamente è stabilita avendo cura che le vibrazioni indotte nelle strutture naturali e artificiali all'intorno, siano contenute entro valori di sicurezza. Tra l'altro in fase d'esecuzione degli scavi fu posta particolare cura per la salvaguardia di una vecchia chiesa sita ad una distanza minima di 50 m dalla galleria.

L'ampiezza delle onde sismiche si riduce all'aumentare della distanza dal punto di sparo ed al ridursi della carica esplosiva fatta brillare. La velocità massima delle particelle di terreno al passaggio del transiente sismico " $v_{\text{max}}$ " è direttamente proporzionale alla carica fatta detonare ed inversamente proporzionale alla distanza dal punto di sparo secondo una relazione del tipo:

$$v_{\text{max}} = K * Q^\alpha / R^\beta$$

dove

K,  $\alpha$  e  $\beta$ : parametri funzione del tipo di volata, di esplosivo e del mezzo di propagazione;  
 R: distanza dalla volata;  
 Q: massima carica fatta brillare per ritardo.

Per la difficoltà di rappresentazione tridimensionale la relazione sopra riportata viene generalmente compressa nella forma:

$$v_{\max} = K * (R/Q^c)^{-\beta} = K * (DS)^{-\beta}$$

dove "c" (=  $\alpha/\beta$ ), K e  $\beta$  sono calcolate mediante analisi di regressione di dati misurati in situ e dove la distanza è scalata sulla carica elevata a "c":  $DS = R/Q^c$ .

Durante i lavori di scavo è stato effettuato il monitoraggio strumentale delle onde sismiche e dalle elaborazioni statistiche (regressione di potenza e T-test) dei dati misurati è stato possibile calcolare la legge di decadimento caratteristica del sito:

$$v_{\max} = 540 * DS^{-1.33} \text{ (equazione curva 99 \% probabilità); } DS \text{ in m/kg}^{0.02}$$

La massima carica ammessa a brillare fu posta pari a 1.7 kg.

Con riferimento alla curva del 99% di probabilità si rileva che l'ampiezza delle vibrazioni indotte sulla scarpata dal brillamento delle mine non ha superato 4.0 mm/s quando il fronte di scavo si trovava alla distanza minima di 40 m (alcuni mesi prima della frana) e non ha superato 1.6 mm/s due giorni prima:

$$v_{\max} = 540 * DS^{-1.33} = 540 * (40/1.7^{0.02})^{-1.33} = 4.0 \text{ mm/s}$$

$$v_{\max} = 540 * DS^{-1.33} = 540 * (80/1.7^{0.02})^{-1.33} = 1.6 \text{ mm/s}$$

(la frequenza predominante del transiente sismico era mediamente pari a 65 Hz).

Per confrontare le sollecitazioni associate al transiente sismico indotto dalle volate a quelle associate agli altri fattori destabilizzanti (condizioni di carico quasi-statico) è stata imposta l'equivalenza delle velocità delle particelle mine - terremoto imponendo eguali spostamenti associati al transiente "S".

In tal modo, con approssimazione conservativa, sono stati trascurati quei fenomeni di incremento della resistenza delle SRM max dovuta alla applicazione "dinamica/transiente" del carico [Folchi R., Simonetti S.]:

$$v (f = 65 \text{ Hz}) \equiv v (f' = 5 \text{ Hz}):$$

$$S = v / (2 * \pi * f) = v' / (2 * \pi * f')$$

$$(v * f') / f = v'$$

$$4 \text{ mm/s} * 5 \text{ Hz} / 65 \text{ Hz} = 0.31 \text{ mm/s};$$

$$1.6 \text{ mm/s} * 5 \text{ Hz} / 65 \text{ Hz} = 0.12 \text{ mm/s};$$

$$\sigma = \rho * C * v_x = 2.2 \text{ t/m}^3 / (9.81 \text{ m/s}^2) * 3'800 \text{ m/s} * 3.1 * 10^{-4} \text{ m/s} = 0.26 \text{ t/m}^2 \cong 0.003 \text{ MPa.}$$

$$\sigma = \rho * C * v_x = 2.2 \text{ t/m}^3 / (9.81 \text{ m/s}^2) * 3'800 \text{ m/s} * 1.2 * 10^{-4} \text{ m/s} = 0.10 \text{ t/m}^2 \cong 0.001 \text{ MPa.}$$

La massima sollecitazione che ha interessato l'unità "Arenacea" per effetto delle vibrazioni indotte dal brillamento delle mine stata pari a 0.003 MPa alcuni mesi prima della frana ed a 0.001 MPa qualche giorno prima, è durata una frazione di secondo e non ha portato effetti irreversibili.

### Sollecitazioni per le onde sismiche indotte dal traffico di mezzi d'opera.

Per la valutazione della sismicità indotta dal traffico di mezzo d'opera sono state effettuate misurazioni in situ.

In condizioni ordinarie di traffico i valori di sismicità indotta al piede della scarpata si sono dimostrati irrilevanti. In condizioni anomale, ovvero nell'ipotesi di transito con un cingolo sul piede della scarpata lato strada (può succedere nel caso in cui due mezzi si incrociano sulla pista) è stata misurata ad un metro una velocità massima pari di 1.9 mm/s con frequenza del valore di picco pari a 30 Hz.

Adottando la stessa legge di decadimento per le onde sismiche indotte dalle mine è stato calcolato il valore delle massime vibrazioni indotte dal traffico veicolare al piede della scarpata:

$v \text{ (mm/s)} = \text{cost.} * R^{-1.33}$ ; con  $v$  velocità delle particella di terreno al passaggio del transiente sismico in mm/s ed  $R$ , percorso sismico, in metri.

$$\text{cost.} = V / R^{-1.33} = 1.9 / 1.0^{-1.33} = 1.9 \Rightarrow v \text{ (mm/s)} = 1.9 * R^{-1.33}.$$

Considerando, con approssimazione conservativa, una distanza media della pista al volume di roccia franata pari a 5 m, si rileva che la velocità massima non ha superato i:

$$v \text{ (mm/s)} = 1.9 * R^{-1.33} = 1.9 * 5^{-1.33} = 0.22 \text{ mm/s e frequenza } 30 \text{ Hz.}$$

Analogamente a quanto fatto per le onde sismiche per il brillamento delle mine è stata calcolata la velocità  $v'$  di frequenza  $f' = 5$  Hz equivalente alla velocità di 0.22 mm/s e frequenza 30 Hz imponendo uguali spostamenti "S":

$$S = v / (2 * \pi * f) = v' / (2 * \pi * f')$$

$$v' = (v * f') / f = 0.22 * 5 / 30 = 0.04 \text{ mm/s;}$$

$$\sigma = \rho * C * v = 2.2 \text{ t/m}^3 / 9.81 \text{ m/s}^2 * 3'800 \text{ m/s} * 4.0 * 10^{-5} \text{ m/s} = 0.03 \text{ t/m}^2 \cong 0.0003 \text{ MPa.}$$

La massima sollecitazione che ha interessato l'ammasso per effetto delle vibrazioni indotte dal transito di mezzi d'opera nella pista adiacente è stata dunque pari a 0.0003 MPa, è durata una frazione di secondo e non ha portato effetti irreversibili.



### Conclusioni.

Quelle con gli esplosivi sono attività di cui generalmente non si ha esperienza quotidiana né talvolta una conoscenza tecnica approfondita. Tale circostanza porta a diffidenza ed alla sopravvalutazione della pericolosità degli effetti indotti all'intorno.

Anche da quanto riportato nella presente memoria si rileva come fattori naturali quali appunto gelo ed erosione, possono indurre azioni di intensità enormemente superiori a quelle invece prodotte dall'uso corretto degli esplosivi.

Dalla analisi delle sollecitazioni associate agli agenti che hanno esercitato una azione destabilizzante sulla scarpata risulta infatti chiaro come la frana sia stata innescata dalla azione combinata del gelo e dell'erosione per dilavamento. Questi fattori hanno prodotto azioni di intensità la più elevata, con effetti irreversibili e concomitanti con l'evento franoso, come sintetizzato nella tabella che segue.

Le sollecitazioni associate alla spinta idrostatica per l'acqua nei giunti al piede e quelle associate alle onde sismiche per terremoti, esplosivi e traffico possono essere invece considerate come irrilevanti perché di entità e di durata notevolmente inferiori ed oltretutto nemmeno concomitanti con l'evento.

<b>FATTORE DESTABILIZZANTE</b>	<b>INTENSITÀ RELATIVA</b>	<b>EFFETTO concomitante durata</b>	
GELO dell'acqua infiltrata nei giunti al piede	100'000	irreversibile	SI
EROSIONE per dilavamento di frammenti di roccia al piede	100	irreversibile	SI
accumulo d'ACQUA NEI GIUNTI di frattura	10	giorni	SI
ONDE SISMICHE per BRILLAMENTO MINE	10	frazioni di secondo	NO
ONDE SISMICHE per TERREMOTI	10	frazioni di secondo	NO
ONDE SISMICHE per TRAFFICO MEZZI D'OPERA	1	frazioni di secondo	NO

## Tabella

A	M
Accelerazione (g)	Magnitudo
0.2	8
0.125	7.5
0.075	7
0.04	6.5

(cfr. Figura 4 per distanza = 50 km)

Equazione della curva:

$$A = \text{cost.} * M^m \Rightarrow \ln(A) = \ln(\text{cost.}) + m \ln(M) \Rightarrow Y = b + mX$$

Risultati elaborazione statistica:

$$m = 7.725074$$

$$r \text{ (coeff. correlazione)} = 0.999$$

$$b = -17.654813$$

$$\text{Equazione della curva: } Y = -17.654813 + 7.725074 X$$

$$X = \ln(3.5) = 1.25276$$

$$Y = -17.654813 + 7.725074 * 1.25276 = -7.977125$$

$$A = \exp(Y) = \exp(-7.977125) = \mathbf{0.00034 \text{ g}}$$

**Tabella 1.-** Regressione di potenza dei dati ricavati dalla figura 4 per il calcolo della accelerazione corrispondente ad una Magnitudo 3.5 a 50 km.

## Riferimenti bibliografici

Cherry S.: *Earthquake ground motions: measurement and characteristics*; edited by Solnes Julius: *Engineering Seismology and earthquake Engineering*; NATO Advanced Study Institutes Series, Noordhoff Int. Publ. Leiden, The Netherlands, 1974.

Dowding H. C.; *Blast vibration monitoring and control*; Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ 07632, 1985.

Folchi R., Simonetti S.; *Le sollecitazioni indotte nell'ammasso roccioso dall'esplosivo: analisi e controlli durante lo scavo della galleria "Scindo Passo" a Favignana (TP)*; Gallerie e Grandi Opere in Sottterraneo, n. 36, 1992.

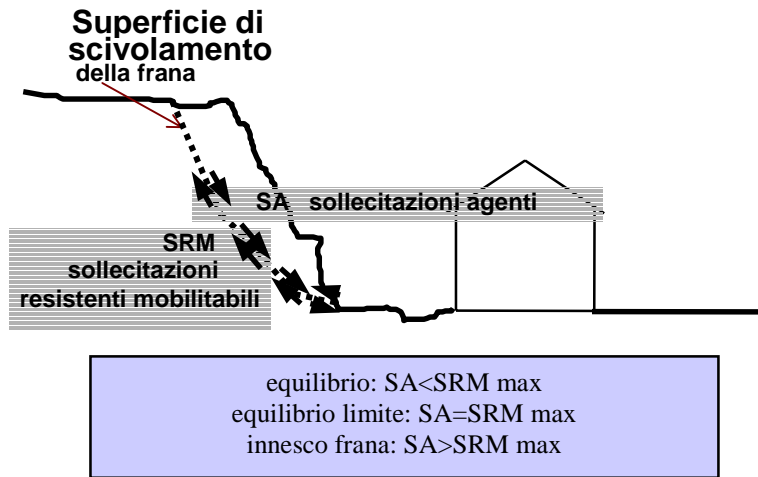
Kolsky H.; *Stress Waves in Solids*; Dover Publications, Inc., New York., 1963.

Lama R. D., Vutukuri V.S.; *Handbook of Mechanical Properties of Rock - Testing Techniques and Results - Volume II*; Trans. tech. Publications, 1989.





**Foto 2, 3 e 4 -**  
**Unità Arenacea:** giunti beanti  
 nella roccia in affioramento;  
 riempimento di materiale argilloso  
 e sabbioso. Livelli siltitici.



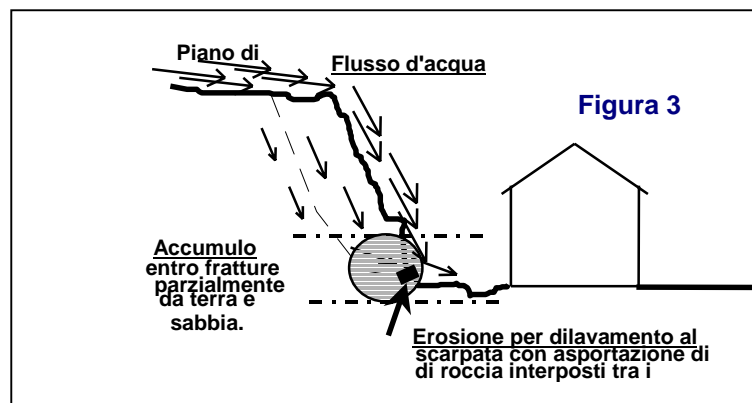
**Figura 2 - Condizioni d'equilibro della scarpata (Equilibrio limite)**

**Azioni destabilizzante prodotte da:**

*erosione per intensa circolazione d'acqua meteorica*

*infiltrazioni d'acqua con accumulo nei giunti di frattura beanti*

*gelo dell'acqua infiltrata nei giunti*



**Azioni destabilizzante prodotte da:**

- onde sismiche indotte sulla scarpata dai*
- onde sismiche indotte dal brillamento di cariche esplosive per lo scavo della galleria*
- onde sismiche indotte dal traffico veicolare*



**Onde sismiche indotte dai terremoti [Cherry S.]**

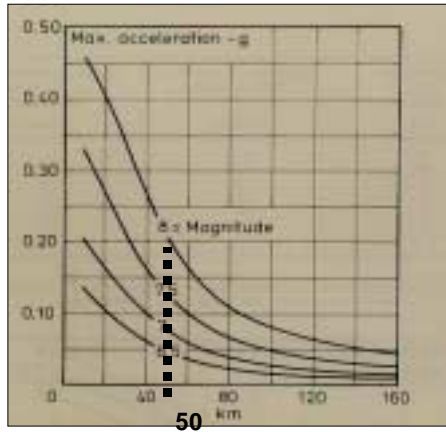


Figura 4 - Accelerazione massima al variare della distanza epicentrale e della Magnitudo

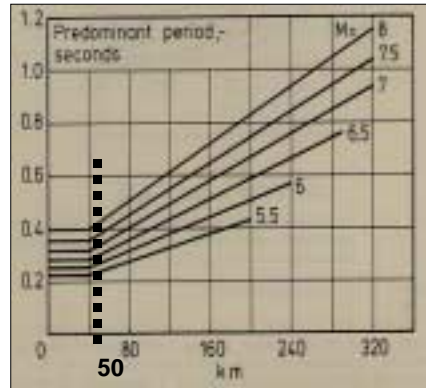
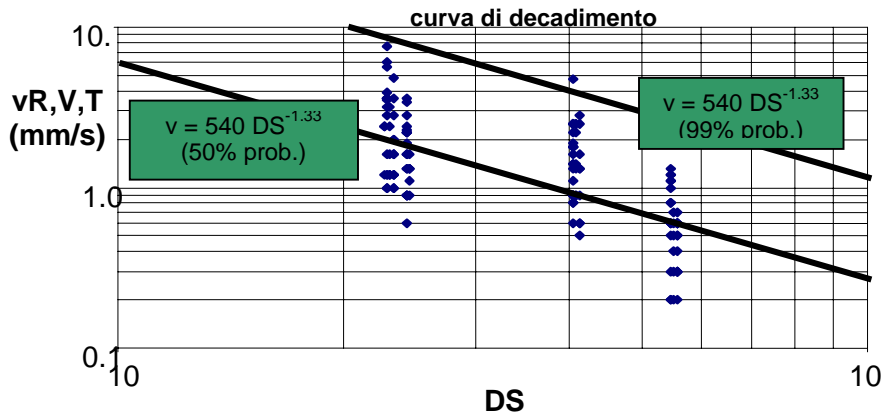


Figura 5 - Periodo predominante dell'accelerazione massima al variare della distanza epicentrale e della Magnitudo

**Onde sismiche indotte dal brillamento delle volate in galleria**

Velocità massima delle particelle di terreno al passaggio del transiente  
valori misurati in situ



*Onde sismiche indotte dal traffico veicolare pesante*

