

## CARATTERIZZAZIONE GEOFISICA E MONITORAGGIO MICROSEISMICO DI UN AMMASSO ROCCIOSO INSTABILE

Colombero Chiara

*Dipartimento Scienze della Terra, UNITO*  
*chiara.colombero@unito.it*

Baillet Laurent

*Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, CNRS*  
*laurent.baillet@ujf-grenoble.fr*

Comina Cesare

*Dipartimento Scienze della Terra, UNITO*  
*cesare.comina@unito.it*

Helmstetter Agnes

*Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, CNRS*  
*agnes.helmstetter@ujf-grenoble.fr*

Jongmans Denis

*Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, CNRS*  
*denis.jongmans@ujf-grenoble.fr*

Larose Eric

*Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, CNRS*  
*eric.larose@ujf-grenoble.fr*

Valentin Johann

*Univ. Grenoble Alpes, ISTerre, CNRS*  
*johann.valentin@ujf-grenoble.fr*

Vinciguerra Sergio

*Dipartimento Scienze della Terra, UNITO*  
*sergiocarmelo.vinciguerra@unito.it*

### Sommario

Nella presente nota vengono illustrati i risultati preliminari della caratterizzazione geofisica e del monitoraggio microseismico dell'ammasso roccioso instabile di Madonna del Sasso (Verbania). I dati raccolti hanno permesso di meglio comprendere le ragioni dell'instabilità in atto, distinguendo chiaramente le frequenze fondamentali di vibrazione dell'ammasso instabile e le sue direzioni di oscillazione. Sono state inoltre stabilite utili correlazioni tra gli stessi parametri ed i fattori ambientali che influenzano l'ammasso ed un utile confronto in back analysis dei dati di monitoraggio geotecnico raccolti in passato sul medesimo sito.

## 1. Introduzione

La rupe di Madonna del Sasso ( $45^{\circ} 79' N$ ,  $8^{\circ} 37' E$ ) si trova nel NW dell'Italia, sulla sponda occidentale del Lago d'Orta (Fig. 1). È un alto affioramento granitico, con un'altezza di circa 200 m, delimitato su tre lati (N, E e S) da pareti approssimativamente verticali. La sommità del rilievo si trova ad un'altitudine di circa 650 m s.l.m. ed è occupata da un piazzale panoramico, di fronte al Santuario del XVIII secolo da cui il luogo prende il nome. Da un punto di vista geologico, l'area è completamente caratterizzata da un ammasso granitico compatto, noto come Granito di Alzo. La morfologia attuale della rupe granitica è stata fortemente influenzata dall'intensa attività mineraria condotta in situ fino a pochi decenni fa. Una caratterizzazione geomeccanica preliminare (Lancellotta et al., 1991), confermata da successive analisi, ha portato a caratterizzare l'ammasso roccioso come intatto, con discontinuità ampiamente spaziate e caratterizzate da una buona qualità della superficie. Si sono inoltre identificati quattro principali gruppi di fratture (immersione/inclinazione): K1 (110/75), K2 (0/80), K3 (150/15) e K4 (50/75). In particolare, lungo la discontinuità K4 vi è una chiara evidenza di movimento: un solco decimetrico attraversa trasversalmente il piazzale. Tali discontinuità tendono a isolare la porzione frontale nord-occidentale della rupe la cui instabilità è quindi principalmente funzione dei ponti di roccia lungo le fratture e delle caratteristiche di incastro al piede (Colombero et al., 2015). È stato stimato un volume di circa  $12.000 \text{ m}^3$  per il settore più instabile (Fig. 1).

Gli studi preliminari sul sito hanno portato alla costruzione (1993-1995) alla base del versante di un rilevato paramassi in terra rinforzata per la protezione dell'abitato sottostante. Tale rilevato a doppia sezione trapezia, è di altezza 8 m e lunghezza 160 m, con antistante vallo; il nucleo a monte è rinforzato con tessuto in polipropilene, quello a valle è costituito da semplice terra compattata.

Il monitoraggio dell'instabilità del versante si è protratto con tecniche standard (misure inclinometriche ed estensimetriche, rilievi topografici) negli anni 1991 - 1993, evidenziando una correlazione tra i movimenti dell'ammasso e la temperatura dello stesso (fenomeni di dilatazione e contrazione della roccia granitica).

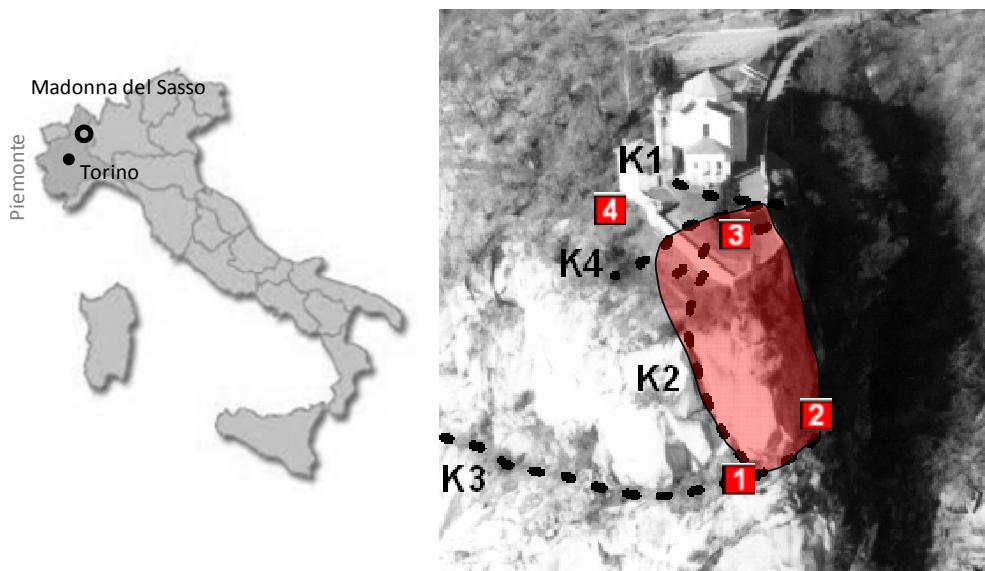


Fig 1. Ubicazione del sito di indagine ed immagine di dettaglio della rupe con evidenza della porzione instabile (area campita in rosso), dei principali piani di frattura (linee tratteggiate nere) e della strumentazione di monitoraggio (quadrati rossi).

Trattandosi però di fenomeni di instabilità potenzialmente repentina le tecniche di monitoraggio standard non sempre possono costituire un utile sistema di allerta. Di contro, prima di un collasso repentino, la roccia rilascia energia e determina la generazione di microtremori. La registrazione ed il monitoraggio delle emissioni acustiche può essere quindi un'utile strategia alternativa per la previsione di rotture dinamiche ed è ampiamente applicata come metodo di monitoraggio negli scavi sotterranei

(Kwiatek e Ben-Zion, 2014). La localizzazione ed identificazione degli eventi microsismici è tuttavia un'operazione non banale e richiede un ampio studio sito-specifico. Al contempo, la misura dei microtremori ambientali è stata recentemente applicata al monitoraggio di ammassi rocciosi potenzialmente instabili, con diverse caratteristiche geologiche e volumetriche, dimostrando le potenzialità dell'analisi spettrale del rumore sismico per rilevare cambiamenti sia reversibili che irreversibili all'interno degli ammassi rocciosi (Bottelin et al., 2013).

Per tali ragioni è stata installata in situ, nell'ambito del progetto SAFER finanziato dall'Università degli Studi di Torino, una rete di monitoraggio microsismico di cui si riportano in questa nota le prime evidenze sperimentali. Prima dell'installazione della rete è stata inoltre intrapresa una caratterizzazione geofisica di dettaglio per confermare la geometria complessiva e lo stato fratturazione dell'ammasso, stabilire la posizione migliore dei nodi della rete di monitoraggio ed avere una definizione del campo di velocità, strumento essenziale per la localizzazione degli eventi. La rete microsismica è stata installata a ottobre 2013; essa è costituita da quattro geofoni triassiali (4.5 Hz) collegati ad un sistema di acquisizione multicanale (Granite 12 canali - Kinematics, Inc.). I primi due geofoni (Fig. 1) sono stati collocati su aree protette al lati delle pareti della rupe, ad una distanza verticale di circa 50 m dal piazzale superiore, rispettivamente sul lato sud-est (1) e nord (2) del volume instabile. Le altre due stazioni sono state collocate in pozzetti accessibili dal piazzale panoramico: la stazione 3 è situata sulla sommità della porzione instabile, all'interno di un pozzetto del piazzale, mentre la stazione 4 è all'esterno della zona instabile a SE dal santuario (Fig. 1). Sono stati inoltre disposti dei misuratori di temperatura sia all'interno delle perforazioni di sondaggio che all'esterno.

## 2. Caratterizzazione Geofisica

Le prove di caratterizzazione geofisica eseguite in situ sono consistite principalmente in una tomografia sismica cross-hole, con sorgente e geofoni sia in foro che in superficie, effettuata nel piazzale antistante il santuario, sfruttando i fori inclinometrici disponibili (Fig. 2a). Tale prova è stata combinata con una tomografia sismica di superficie lungo il medesimo allineamento. Per maggiori dettagli sulla disposizione delle prove e la strumentazione utilizzata si faccia riferimento a Colombero e Comina (2014). I dati raccolti (primi arrivi) sono stati invertiti per ottenere un'immagine tomografica del volume investigato con l'uso del software GeoTomCG, che esegue l'analisi tomografica tridimensionale con posizioni della sorgente e del ricevitore in qualsiasi configurazione all'interno di una griglia 3-D.

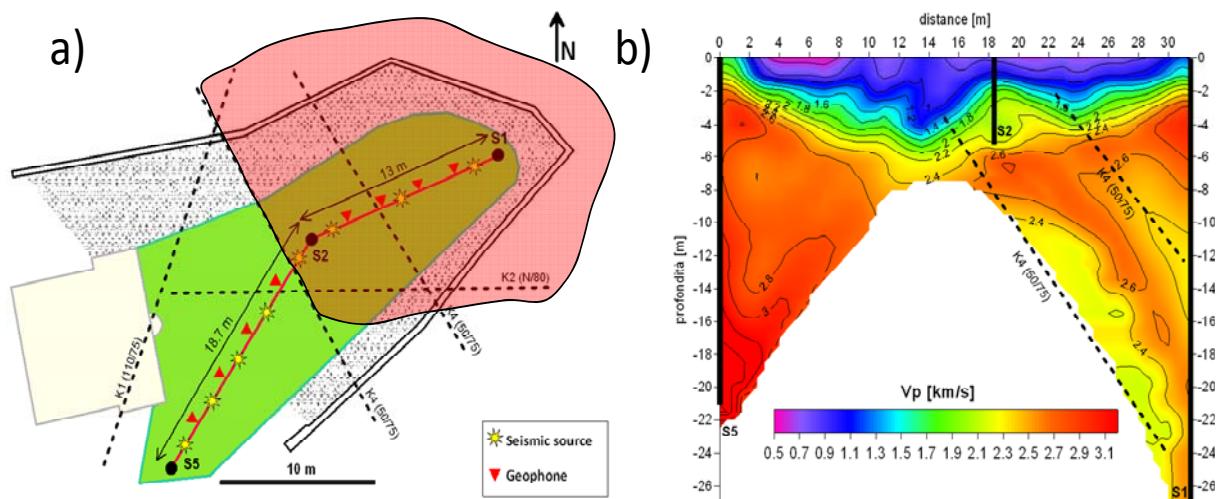


Fig 2. Schema della disposizione delle indagini sismiche sul piazzale antistante il santuario (a) e risultato della tomografia sismica cross hole in onde P (b).

In Figura 2b sono riportati i risultati della tomografia sismica in onde P (risultati simili si ottengono anche per le onde di taglio). L'immagine sismica si correla bene sia con la stratigrafia delle perforazioni di sondaggio che con lo stato di fratturazione previsto. Al di sotto di una coltre di alterazione superficiale (sabbione di riempimento) si osservano velocità medio-alte del granito intatto nella zona stabile del piazzale (sud-ovest) mentre sono evidenziate due fratture principali con una marcata riduzione della velocità e un'importante localizzazione dei raggi sismici nella zona instabile (nord-est). L'ubicazione e l'orientazione di queste zone a velocità ridotta sono in accordo con le caratteristiche del sistema K4, che, tra i due fori, mostra anche manifestazioni superficiali (Fig. 1). Dal campo di velocità ricavato è quindi possibile ipotizzare l'andamento e la continuità di tale sistema di frattura, nonché ottenere dei valori di riferimento della velocità delle onde sismiche, importanti per la localizzazione degli eventi microsismici.

### 3. Monitoraggio microsismico

La rete microsismica installata acquisisce sia registrazioni in modalità continua (file orari del rumore sismico per tutto il periodo di osservazione), che eventi singoli (trigger) qualora la soglia del segnale superi determinati livelli del rapporto STA/LTA pre-impostati ed opportunamente calibrati. Sulla prima tipologia di dati è stata condotta l'analisi delle caratteristiche spettrali mentre i secondi sono oggetto di analisi statistica e tentativi di localizzazione. I dati sotto riportati si riferiscono al periodo di osservazione che va da ottobre 2013 ad agosto 2014.

#### 3.1 Misure del rumore sismico

Diversi studi hanno rivelato una significativa amplificazione spettrale a determinate frequenze (il cui valore dipende principalmente dal volume e dalle condizioni di vincolo dell'ammasso) e polarizzazioni del campo d'onda lungo le principali direzioni di movimento, rivelando come le caratteristiche spettrali possano essere facilmente estratte dai dati di rumore sismico (Bottelin et al., 2013).

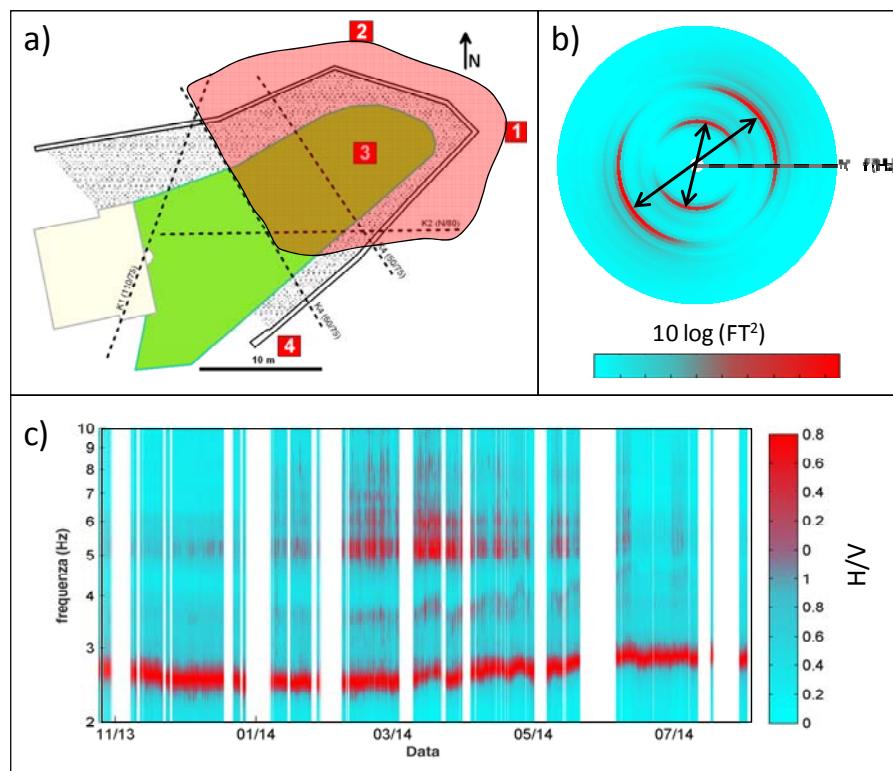
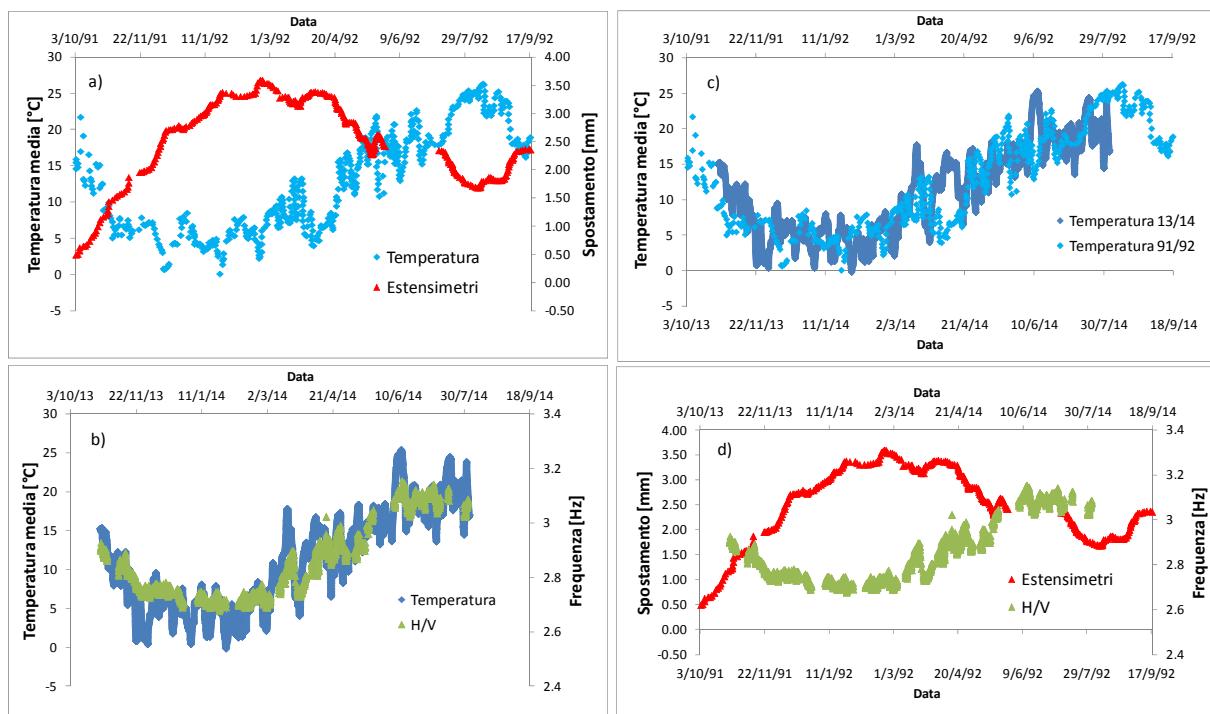


Fig 3. Schema della disposizione delle stazioni di monitoraggio rispetto al piazzale antistante il santuario (a) ed esempio dei risultati degli spettri polari (b) e del rapporto H/V per la stazione 3 nel periodo di osservazione.

Pertanto, la seguente fase di studio si è concentrata sul calcolo dei rapporti spettrali tra le componenti orizzontali e verticale di ciascuna stazione (metodo H/V) e tra le stesse componenti di stazioni poste sui settori potenzialmente instabili e la stazione 4, posta in zona stabile. Per ottenere informazioni sull'orientazione delle frequenze naturali rilevate, sono stati inoltre calcolati gli spettri di Fourier per ogni angolo azimutale, con incremento angolare di  $1^\circ$ . Un esempio dei risultati ottenuti per la stazione 3 (posta al di sopra della zona instabile) è riportato in Figura 3. E' possibile distinguere due principali frequenze di risonanza (rispettivamente a circa 3 Hz e 5.5 Hz). L'orientazione di tali frequenze (Fig. 3b) ben si associa con lo stato di fratturazione dell'ammasso (oscillazione perpendicolare alle principali fratture). L'andamento variabile nel tempo, particolarmente della frequenza di risonanza principale (Fig. 3c), potrebbe essere indice di variazioni di vincolo della porzione instabile e dare utili indicazioni in merito.



*Fig. 4. Correlazioni tra dati di monitoraggio nei due periodi di osservazione e temperatura: (a) Dati estensimetrici e temperatura, (b) Frequenza di risonanza e temperatura; e confronto tra le temperature medie registrate nei due periodi (c) e tra la frequenza di risonanza ed i dati estensimetrici (d).*

Nei dati di monitoraggio pregressi disponibili era già stata osservata una correlazione tra gli spostamenti estensimetrici misurati e la temperatura ambientale, che evidenzia fenomeni di contrazione dell'ammasso (con conseguente apertura delle fratture) alla diminuzione della temperatura e di dilatazione ad un suo aumento (Fig. 4a). I dati del monitoraggio sismico ben riflettono tale comportamento correlando la variazione della frequenza di risonanza con le variazioni della temperatura. In particolare si osserva una diminuzione della frequenza di risonanza al diminuire della temperatura media e di converso un suo incremento al crescere della stessa (Fig. 4b). Risulta chiaro quindi come le fluttuazioni di temperatura si riflettano in un cambiamento delle condizioni di vincolo della porzione instabile, tale fenomeno è colto correttamente dalle variazioni della frequenza di risonanza. Pur facendo riferimento a periodi di osservazione molto distanti nel tempo, è potenzialmente stimabile una correlazione quantitativa tra le variazioni in frequenza e gli spostamenti estensimetrici (Fig. 4d) data la somiglianza nel lungo periodo delle variazioni di temperatura (Fig. 4c).

### **3.2 Eventi microsismici**

Durante il periodo monitorato sono stati rilevati un gran numero di eventi impulsivi, con caratteristiche spettrali riconducibili a possibili eventi microsismici legati a fenomeni di microfratturazione in roccia. Finora, la localizzazione delle sorgenti di questi eventi, fondamentale per stabilirne un'origine interna o esterna alla porzione rocciosa instabile, non è stato raggiunta. I problemi principali nella localizzazione degli eventi, potrebbero essere collegati a diverse ragioni, tra cui principalmente fenomeni di scattering e deamplificazione delle onde sismiche indotti dalla morfologia del sito e dalle condizioni di fratturazione. La numerosità degli eventi/giorno registrati appare qualitativamente riflettere il comportamento dell'ammasso sopra descritto in funzione della variazione della temperatura ambientale.

## **4. Conclusioni e Sviluppi futuri**

Lo studio finora svolto non ha evidenziato variazioni irreversibili nelle condizioni di stabilità dell'ammasso roccioso di Madonna del Sasso, bensì fluttuazioni stagionali della colonna potenzialmente instabile, accuratamente tracciate da variazioni della frequenza di risonanza e legate essenzialmente alla temperatura dell'aria. L'orientazione delle prime frequenze naturali risulta perpendicolare alla direzione delle principali fratture aperte che bordano il blocco potenzialmente instabile. Una modellazione termo-meccanica del sito e un'analisi modale delle frequenze naturali associate al settore instabile, permetterà di confermare e meglio quantificare le evidenze sperimentali presentate. Da tali analisi sarà inoltre possibile tentare una correlazione quantitativa tra i parametri spettrali ed i movimenti dell'ammasso come suggerito dalla corrispondenza delle curve di variazione della frequenza di risonanza e dei dati estensimetrici.

## **Ringraziamenti**

I risultati riportati in questa nota sono stati ottenuti nell'ambito del Progetto d'Ateneo 2012 dell'Università degli Studi di Torino - SAFER: "Detecting Slow Deformation Signals Preceding Dynamic Failure: A New Strategy For The Mitigation Of Natural Hazards", supervisionato da Sergio Vinciguerra.

## **Bibliografia**

- Bottelin, P., Jongmans, D., Baillet, L., Lebourg, T., Hantz, D., Lévy, C., Le Roux, O., Cadet, H., Lorier, L., Rouiller, J.-D., Turpin, J. and Darras, L. (2013) "Spectral Analysis of Prone-to-fall Rock Compartments using Ambient Vibrations". *J Environ Eng Geophys*, 18, 205-217.
- Colombero C. e Comina C. (2014) "Geophysical characterization of an instable rock mass", Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, Eurock 2014 - the 2014 ISRM European Rock Mechanics Symposium, Vigo, 27-29th May 2014, CRC Press - Taylor & Francis Group, ISBN 9781138001497.
- Colombero C., Comina C., Ferrero A.M., Mandrone G., Umili G. e Vinciguerra S. (2015) "An integrated approach for monitoring slow deformations preceding dynamic failure in rock slopes: a preliminary study" in G. Lollino et al. (eds.), Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6, DOI: 10.1007/978-3-319-09060-3\_125, © Springer International Publishing Switzerland 2015 (ISBN 978-3-319-09059-7 ISBN 978-3-319-09060-3).
- Kwiatek G. and Y. Ben-Zion (2013) "Assessment of P and S wave energy radiated from very small shear-tensile seismic events in a deep South African mine", *J. Geoph. Res.: Solid Earth*, Vol. 118, 3630–3641, Doi:10.1002/Jgrb.50274, 2013.
- Lancellotta R., Gigli P. e Pepe C. (1991) "Rupe del Santuario di Madonna del Sasso, Relazione tecnica riguardante la caratterizzazione geologico-strutturale dell'ammasso roccioso e le condizioni di stabilità della rupe", relazione tecnica commissionata dal Ministero dei Lavori Pubblici - Provveditorato alle Opere Pubbliche per il Piemonte e la Valle d'Aosta.