

ANALISI dei FENOMENI FRANOSI
Progetto ATTIVITÀ DI RICERCA E
SVILUPPO SULLE
TECNOLOGIE E STRUMENTI DELLA GEOMATICA
PER IL MONITORAGGIO DI VERSANTI IN
DISSESTO E INFRASTRUTTURE
Verbano – Regione Piemonte

Frana di Madonna del Sasso

DATA PUBBLICAZIONE
2018

ANALISI dei FENOMENI FRANOSI
Progetto “ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO SULLE
TECNOLOGIE E STRUMENTI DELLA GEOMATICA PER IL
MONITORAGGIO DI VERSANTI IN DISSESTO E
INFRASTRUTTURE”
Verbano - Regione Piemonte

Frana di Madonna del Sasso

DATA PUBBLICAZIONE
Ottobre 2018

AUTORI

Dott. Geol. Daniele Giordan

Dott. Davide Notti



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica

Indice

Acronimi e Abbreviazioni.....	1
Introduzione	2
1 Analisi dei lavori pregressi.....	3
1.1 Scheda SIFRAP (ARPA Piemonte)	3
1.2 Altri studi.....	3
2 Aspetti geologico-geomorfologici, strutturali e idrogeologici.....	7
2.1 Inquadramento geologico, strutturale e geomorfologico	7
2.2 Stratigrafie, profili geologici e dati geofisici.....	12
2.2 Aspetti relativi a Scenari di rischio e ai Modelli di propensione al dissesto	17
3 Sistemi di monitoraggio. Dati ed analisi.....	20
3.1 Storia degli strumenti di monitoraggio presenti sul sito	20
3.2 Aspetti relativi all'analisi delle reti di monitoraggio	21
3.2.1 Strumenti di monitoraggio non più attivi	21
3.2.2 Analisi degli strumenti attualmente attivi	25
3.3 Sistema di monitoraggio nell'ambito del progetto corrente.....	28
4 Sintesi e proposte di integrazione.....	31
4.1 Analisi dei lavori pregressi.	31
4.2 Analisi del sistema di monitoraggio	32

Acronimi e Abbreviazioni

CNR	Consiglio Nazionale delle Ricerche
IRPI	Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
GMG	Geohazard Monitoring Group
SIFRAP	Sistema Informativo Frane in Piemonte
ARPA	Agenzia Regionale Protezione Ambiente
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar

Introduzione

Comuni: Madonna del Sasso

Tipologia di frana: Complessa (Scivolamento traslativo e ribaltamento), Si tratta di uno sperone roccioso delimitato da sistemi di fratture dell'ammasso roccioso che isolano due blocchi potenzialmente instabili A e B, soggette a deboli movimenti.

Quota min.-max.: 415 – 635

Uso del Suolo: Bosco, con una urbanizzazione sulla cima della rupe (Santuario e relativo piazzale)

Geologia: Dominio Australpino, Graniti della serie dei Laghi, in particolare "Granito di Alzo" (graniti biotitici talora a struttura porfiroide, o con feldspati rossi, passanti regionalmente a micrograniti e localmente a forme tonalitiche e dioritiche, con frequenti impacchi di gneis del contatto, intrusi nelle serie dei laghi e nella serie dioritico- kinzigitica)

Geomorfologia: La rupe di Madonna del Sasso è costituita da uno sperone roccioso granitico ad orientazione E-O, limitato verso, nord, est e sud da pareti subverticali alte circa 200 m. Ai piedi delle pareti accumuli di blocchi da metrici a decametrici derivanti da crolli e da passate attività estrattive.

Dinamica della frana ed eventi recenti: Lo studio geologico-strutturale effettuato, individua due porzioni potenzialmente instabili (A e B). I dati relativi ai misuratori di giunti (1991-1994) mostrano una tendenza al ribaltamento la porzione A e sono state osservati cicli di espansione e contrazione delle fratture legate alla temperatura ed alle precipitazioni, confermati anche da recenti modellazioni numeriche e studi geofisici. I dati topografici aggiornati al 2017 mostrano una tendenza del blocco a scivolare verso NE di 2 mm/anno.

Sistema di monitoraggio: Sì, Attivo (attualmente misure topografiche, distometriche e fessurimetri), nel passato anche estensimetri e misuratori di giunti, le letture inclinometriche poco significative sono state abbandonate a fine anni '90.

1 Analisi dei lavori progressi.

1.1 Scheda SIFRAP (ARPA Piemonte)

La scheda SIFRAP relativa alla frana di Madonna del Sasso (103-01641-00) presenta un approfondimento di secondo livello. Sono riassunte le principali caratteristiche della frana, principalmente derivanti dagli studi di Lancellotta et al (1991) e dalla scheda di Arpa Piemonte del 2010.

Sezione Descrizione Generale Del Fenomeno: *“La rupe su cui sorge il Santuario di Madonna del Sasso, sperone granitico situato lungo la sponda occidentale del lago d’Orta, è soggetta a condizioni di instabilità dovute alla fratturazione dell’ammasso roccioso. Nel luglio del 1991 è stato effettuato uno studio geologico-strutturale della rocca, che ha permesso di determinare due porzioni a rischio (A e B) individuate da 4 famiglie di discontinuità (K1, K2, K3 e K4). L’instabilità dello sperone roccioso sommitale della rupe è probabilmente nota da tempo, sembrerebbe infatti che un’antica chiesa, alcune pietre della quale sono ancora osservabili lungo il muro perimetrale del belvedere, fosse stata trasferita appunto per fenomeni di instabilità “*

È presente un’analisi dei dati di monitoraggio aggiornata al 2010: *Le misure inclinometriche sono state effettuate dal gennaio del 1991 (misura di origine) fino al maggio 2001, dopodiché le misure sono state sospese per scarsa significatività. Solo lo strumento ubicato al centro del piazzale antistante la chiesa ha dato misure coerenti con il movimento dell’ammasso roccioso. In particolare si individua un movimento netto alla profondità di 11 m con azimuth NE e velocità di deformazione pari a circa 1,3 mm/anno.*

Nel settembre 1991 venne attivata una rete di controllo geomeccanica consistente in 10 misuratori di giunti per misurare la porzione A; 5 sulla parete nord, lungo la frattura K1 e 5 sulla parete sud, lungo la frattura K2. Sono stati individuati movimenti massimi dell’ordine dei 3-4 mm/y. Le dislocazioni sono legate in parte alle variazioni termiche stagionali, la componente residua registrata al termine dei cicli annuali osservati è pari a circa 2 mm/y. L’entità delle misure mostra una lieve tendenza al ribaltamento della suddetta porzione di roccia.

Presso la rupe (parete nord) sono state installate, il 23 marzo 2007, 2 basi distanziometriche. L’ultima misura effettuata è del novembre 2010. Le velocità finora registrate sono dell’ordine di 3 mm/y (D1 in distensione e D2 in contrazione). In ogni caso, i movimenti registrati rientrano nei range di dilatazioni dovuti alle escursioni termiche a cui sono sottoposte le rocce della rupe e non risultano quindi associabili a uno spostamento ben definito.

1.2 Altri studi

Dopo danni al piazzale della chiesa all’inizio degli anni ’80 furono installati alcuni inclinometri ed a seguito di una accelerazione e a nuovi danni si decisero indagini più approfondite nei primi anni ’90. I principali studi sul sito in esame sono stati condotti da Lancellotta et al., (1991), una relazione tecnica di della Regione

Piemonte (1993) da ARPA Piemonte (2010) e da Colombero et al., (2016, 2017a, 2017b)

Lancellotta et al., 1991: Nello studio è stata fatta un'analisi strutturale e geo-meccanica del sito. Sono state individuati quattro principali sistemi di fratture che isolano due settori potenzialmente instabili. Le conclusioni più significative dello studio sono:

“La prima zona, indicata nella presente relazione come zona A, è sostanzialmente individuata dai piani di discontinuità K1 e K2. La stabilità attuale è garantita unicamente dal supporto al piede rappresentato dal piano K3. Tale supporto è tuttavia costituito da un insieme di porzioni rocciose in parte dislocate, in parte trattenute dalla vegetazione. Non si ritiene che tale situazione possa continuare ad offrire garanzie di stabilità in futuro, per cui nel caso in cui tale supporto dovesse venire a mancare lo scivolamento del cuneo roccioso soprastante si verificherebbe lungo la retta di intersezione dei piani K1 e K2, coinvolgendo un volume di materiale stimabile in 12'000 m³.”

“La documentazione prodotta prova come le condizioni del piede dell'ammasso roccioso analizzato siano decisamente precarie, e come non sia possibile continuare a fare affidamento su tale situazione di fatto”.

Regione Piemonte (1993): In questa relazione sono analizzati i risultati preliminari dei primi 18 mesi di monitoraggio (fatto con misuratori di giunti) del sito di Madonna del Sasso, a seguito dello studio di Lancellotta (1991). Le principali conclusioni di questa relazione sono:

- i misuratori di giunti indicano un movimento massimo di circa 6 mm nella parte alta dell'ammasso e movimenti minimi (ordine di 1 mm) presso il piede dell'ammasso stesso;
- il volume roccioso instabile presenta un movimento stagionale legato alle temperature medie. L'apertura delle fratture è massima nel periodo invernale e minima nel periodo estivo
- le velocità massime di apertura o chiusura delle discontinuità sono nell'ordine massimo dei 0.25 mm/giorno
- le velocità di apertura non presentano trend ben definiti e sembrano essere in relazione con l'andamento medio della temperatura su periodi medio-lunghi più che non con le variazioni giornaliere.
- verifica del comportamento delle curve di spostamento, al fine di identificare trend che si discostino dagli andamenti stagionali sinora rilevati. Il confronto avviene confrontando i dati via via raccolti con i diagrammi di spostamento che riportano le aperture in funzione della temperatura media per le varie stagioni. Un trend positivo anomalo di spostamento rispetto a quelli stagionali può ragionevolmente interpretarsi come un peggioramento complessivo della situazione di stabilità.

Arpa Piemonte (2010): In questa relazione vengono integrati i rilievi geo-meccanici di Lancellotta, le analisi fatte con la relazione della Regione Piemonte del 1993 con l'analisi dei dati del sistema di monitoraggio installato più recentemente (estensimetri e basi topografiche):

“Le risultanze ottenute delineano, in accordo con i dati precedenti, un trend preciso, caratterizzato da un progressivo spostamento prevalente verso E. Gli spostamenti rilevati sull'asse verticale (asse z) presentano, per tutti i capisaldi di

controllo, andamenti tra loro coerenti; i dati mediati indicano abbassamenti cumulati (dal 2006) da 9 mm a 11.50 mm. Analizzando tutta la serie di letture si osserva una variazione stagionale delle risultanze sull'asse z, con abbassamenti nel periodo tardo invernale e lievi innalzamenti o stabilità nel periodo autunnale."

Colombero et al., (2016; 2017a; 2017b): In questi studi si analizzano i dati di varie campagne geofisiche (tomografie sismiche, elettriche, prove di laboratorio su campioni ed analisi della micro-sismicità) per caratterizzare e modellizzare l'ammasso instabile di Madonna del Sasso. Con questi studi si ha un quadro più esaustivo e completo sul sito di Madonna del Sasso

I principali risultati derivanti da questi studi posso essere riassunti nei seguenti punti (Colombero et al., 2016; 2017a):

- 1. I risultati delle analisi geofisiche confermano le evidenze derivanti dalle indagini geo-meccaniche e dalle stratigrafie disponibili; nonostante alcune discrepanze fra le indagini down-hole cross-hole anche per il complesso assetto geologico-strutturale e geomorfologico*
- 2. Le indagini cross-hole hanno permesso di mappare le zone di fratturazione, mentre le indagini down-hole hanno permesso di caratterizzare in maniera puntuale le velocità sismiche delle zone fratturate.*
- 3. Le indagini fatte sui campioni prelevati in sito hanno permesso di caratterizzare la litologia e le caratteristiche geomeccaniche individuando zone di alterazione ed anisotropie dei graniti correlati con le velocità sismiche rilevate con le altre indagini*
- 4. Infine tutti risultati hanno confermato la presenza di profonde e pervasive fratture dell'ammasso roccioso che isolano porzioni potenzialmente soggette a crollo, inoltre le velocità sismiche relativamente basse all'interno dei blocchi instabili suggeriscono come questo siano diffusamente fratturati*

Nel sito è stato anche condotto un'analisi degli eventi micro-sismici come possibili precursori di eventi di collasso e come un possibile sistema di monitoraggio non convenzionale che dovrebbe essere approfondito con ulteriori indagini. Dai risultati emerge una correlazione fra eventi e temperatura (escursione termica e differenza fra i due versanti della rupe) e precipitazioni.

In Colombero et al 2017b Sono state fatte anche simulazioni numeriche 3d basate sui dati geofisici sulle vibrazioni dei blocchi instabili: Sono stati rilevati tre tipi di vibrazione dei blocchi due perpendicolari e paralleli alle scarpate mentre un terzo legato ad un movimento di torsione, tuttavia la presenza di un sistema di fratturazione complicato e la presenza di due blocchi instabili complica, nella realtà il comportamento dei due blocchi. I risultati di questi modello sono un aiuto nella comprensione del meccanismo di vibrazione dell'ammasso instabili per un monitoraggio di possibili collassi in base ai dati microsismici.

Riassunto bibliografico

Studi su Madonna del Sasso

ARPA Piemonte (2010) – Sito di/ Site de Madonna del Sasso (VB), Italia progetto MASSA, *Medium And Small Size rockfall hazard Assessment ALCOTRA « Alpes Latines Coopération Transfrontalière » 2007-2013*
http://massa.geoazur.eu/Docs_pdf/Action2/Fiches%20de%20sites/madonna%20del%20sasso.pdf

ARPA Piemonte – Scheda SIFRAP di II Livello frana 103-01641-00 Madonna del Sasso
http://webgis.arpa.piemonte.it/Web22/sifrap/ii_livelli/103-01641-00.pdf

Lancellotta, R., Gigli, P. & Pepe, C. (1991). *Relazione tecnica riguardante la caratterizzazione geologico-strutturale dell'ammasso roccioso e le condizioni di stabilità della rupe*. Studio privato

Colombero, C., Comina, C., Umili, G. and Vinciguerra, S., 2016. Multiscale geophysical characterization of an unstable rock mass. *Tectonophysics*, 675, pp.275-289.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040195116001529>

Colombero (2017a) *Microseismic strategies for characterization and monitoring of an unstable rock mass*. Tesi di dottorato

Colombero, C., Baillet, L., Comina, C., Jongmans, D. and Vinciguerra, S., (2017b). *Characterization of the 3-D fracture setting of an unstable rock mass: from surface and seismic investigations to numerical modeling*. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2017JB014111/abstract>

Regione Piemonte (1993) - La rete di controllo sulla Rupe di Madonna del Sasso, sintesi dei primi 18 mesi di misure. Torino, Aprile 1993 report interno.

Inquadramento geologico generale

Piana, F., Fioraso, G., Irace, A., Mosca, P., d'Atri, A., Barale, L., Falletti, P., Monegato, G., Morelli, M., Tallone, S. and Vigna, G.B., 2017. Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps–Apennines interference zone). *Journal of Maps*, 13(2), pp.395-405.

Tabella 1.1. Elenco dei lavori e delle cartografie associate, divisi sulla base dei principali aspetti tematici riscontrati

	Lancellotta (1991)	Regione Piemonte (1993)	ARPA Piemonte (2010)	Colombero (2017-2016)
GEOLOGIA- GEOMORFOLOGIA- ANALISI STRUTTURALE	Relazione Geologica	X	-	X
	Geomorfologica			
	Carta Geologica		-	
	Carta Geomorfologica		-	
	Carta rilievi strutturali	X	-	X
Profili geologici	X		-	X



ANALISI IDROLOGICA-
IDROGEOLOGICA

SCENARI di RISCHIO/MODELLI di PROPENSIONE al DISSESTO		X		-	X
ANALISI RETI di MONITORAGGIO	Analisi dati di monitoraggio	-	X	X	X

2 Aspetti geologico-geomorfologici, strutturali e idrogeologici.

2.1 Inquadramento geologico, strutturale e geomorfologico

- 1. Geologia.** La zona di studio si trova nel dominio Australpino, entro le rocce cristalline del Massiccio magmatico Permiano, il grande batolite granitico che si estende dal Lago Maggiore allo sbocco della Valle dell'Orco (Fig. 2.1). L'età permiana del complesso di vulcaniti, che orla la parte meridionale del Massiccio del Laghi ed i rapporti tra questo complesso e le masse granitiche, permettono di attribuire l'intrusione granitica al ciclo magmatico ercinico, o tardo ercinico, del Paleozoico superiore. La rupe è integralmente costituita dal Granito di Alzo/Quarna (Fig. 2.2), che costituisce uno dei principali ammassi in cui è frazionato il complesso magmatici permiano. Alla base del versane sono presenti depositi morenici.

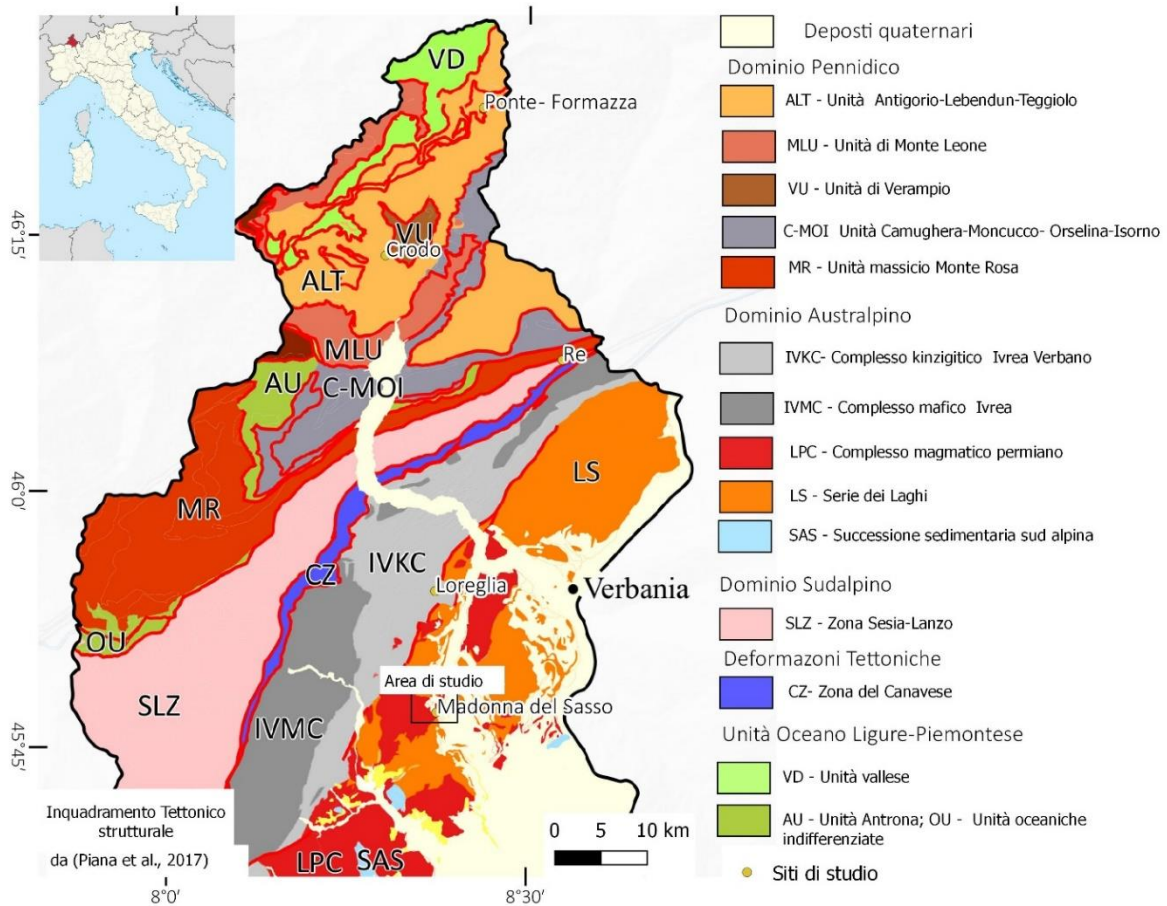


Figura 2.1. Carta di Inquadramento geologico dell'area di studio tratta da Piana et al. (2017)

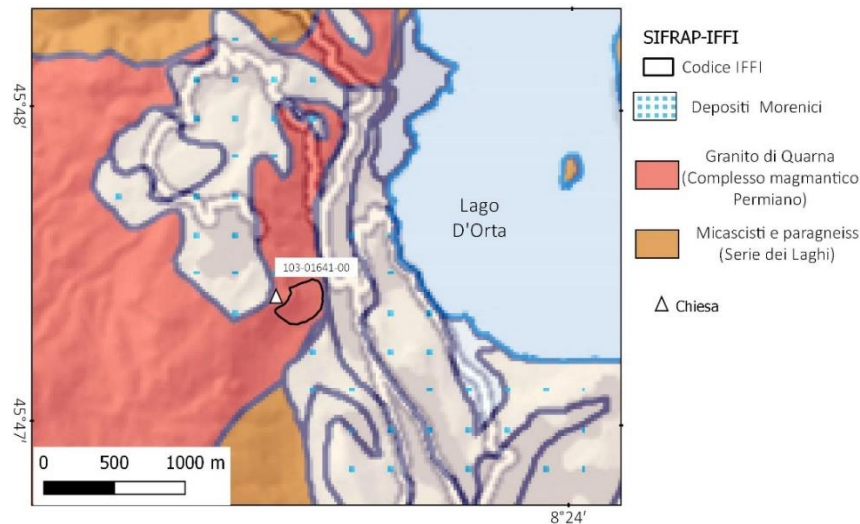


Figura 2.2. Inquadramento geologico di dettaglio dalla carta di Piana et al. (2017)

2. **Geomorfologia.** La rupe di Madonna del Sasso è costituita da uno sperone roccioso granitico ad orientazione E-O, limitato verso nord, est e sud da pareti subverticali alte circa 200 m (Fig. 2.3). Ai piedi delle pareti sono visibili, in particolare a nord sono visibili accumuli derivanti da crolli ed attività estrattiva con blocchi da metrici a decimetrici, in parte coperti da vegetazione, derivante da crolli. Alla base del versante è presente un vallo

/ rilevato paramassi, costruito agli inizi degli anni '90. La perimetrazione della frana IFFI 103-01641-00 comprende sia l'area die blocchi instabili individuati da Lancellotta nel 1991 sia l'area potenzialmente soggetta crolli. Nel passato la rupe di Madonna del Sasso era stata soggetta ad attività di estrazione del granito, fino alla fine degli anni '70, il detrito a SE della rupe di Madonna del Sasso deriva anche da queste attività

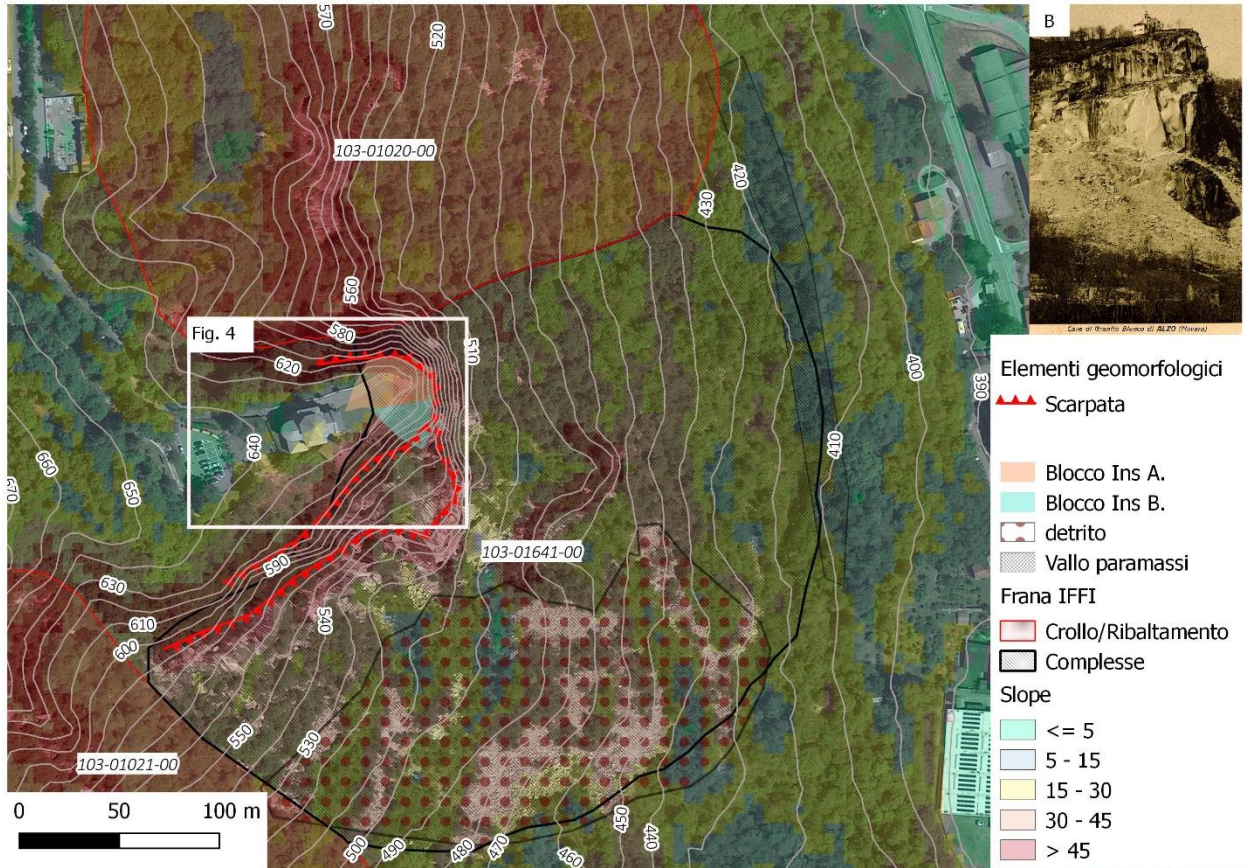


Figura 2.3. Principali elementi geomorfologici; B) Attività estrattive del "Granito di Alzo" agli inizi del '900 sul versante sud di Madonna del Sasso.

3. **Assetto strutturale / cinematico.** L' analisi strutturale eseguita da Lancellotta nel 1991, e confermata dagli studi di Colombo et al., ha permesso di segnalare con chiarezza la presenza di quattro sistemi principali di discontinuità, riportati nella Tabella 2.1

Tabella 2.1 – orientazione delle principali discontinuità.

K (F)	Inclinazione (°)	Immersione (°)
K1	75	110
K2	80	0 - 355
K3	15	150
K4	75	50

Le principali caratteristiche di questi sistemi sono:

Spaziatura. La spaziatura è generalmente metrica; nelle zone limitrofe a piani K1 la frequenza è maggiore.

Persistenza. Le osservazioni svolte alla scala dell'affioramento hanno permesso di stabilire che i sistemi principali osservati si sono sovrapposti presumibilmente con il seguente ordine cronologico dal più antico al più recente: K3, K1, K2 e K4. Tutti i sistemi osservati hanno persistenza da decimetrica ad ettometrica, pervasivi e generalmente poco dislocati.

Scabrezza. Non sono state eseguite misure dirette, bensì dall'esame visivo le pareti delle discontinuità presentano profili piani e lisci, mentre a grande scala si osservano ondulazioni con diversi punti di contatto tra le pareti che modificano talora sensibilmente l'andamento geometrico delle discontinuità;

Apertura - grado di alterazione - materiali di riempimento. Dalle osservazioni effettuate in sito si è evidenziato che in prevalenza le discontinuità sono aperte con apertura da millimetrica a centimetrica. Le pareti presentano talora variazioni di colore imputabili a processi di alterazione dovuta alla percolazione dell'acqua. Il materiale di riempimento è prevalentemente assente, in alcune discontinuità (appartenenti ai sistemi K1 - K3) si rileva sabbia limosa e roccia disgregata.

L'analisi cinematica ha portato all'identificazione di due blocchi potenzialmente instabili "A" e "B" (Fig. 2.4. e 2.5.): Sono sostanzialmente individuati dai piani di discontinuità K1 e K2. La stabilità attuale è garantita unicamente dal supporto al piede rappresentato dal piano K3. Tale supporto è tuttavia costituito da un insieme di porzioni rocciose in parte dislocate, in parte trattenute dalla vegetazione. Non si ritiene che tale situazione possa continuare ad offrire garanzie di stabilità in futuro, per cui nel caso in cui tale supporto dovesse venire a mancare lo scivolamento del cuneo roccioso soprastante si verificherebbe lungo la retta di intersezione dei piani K1 e K2.

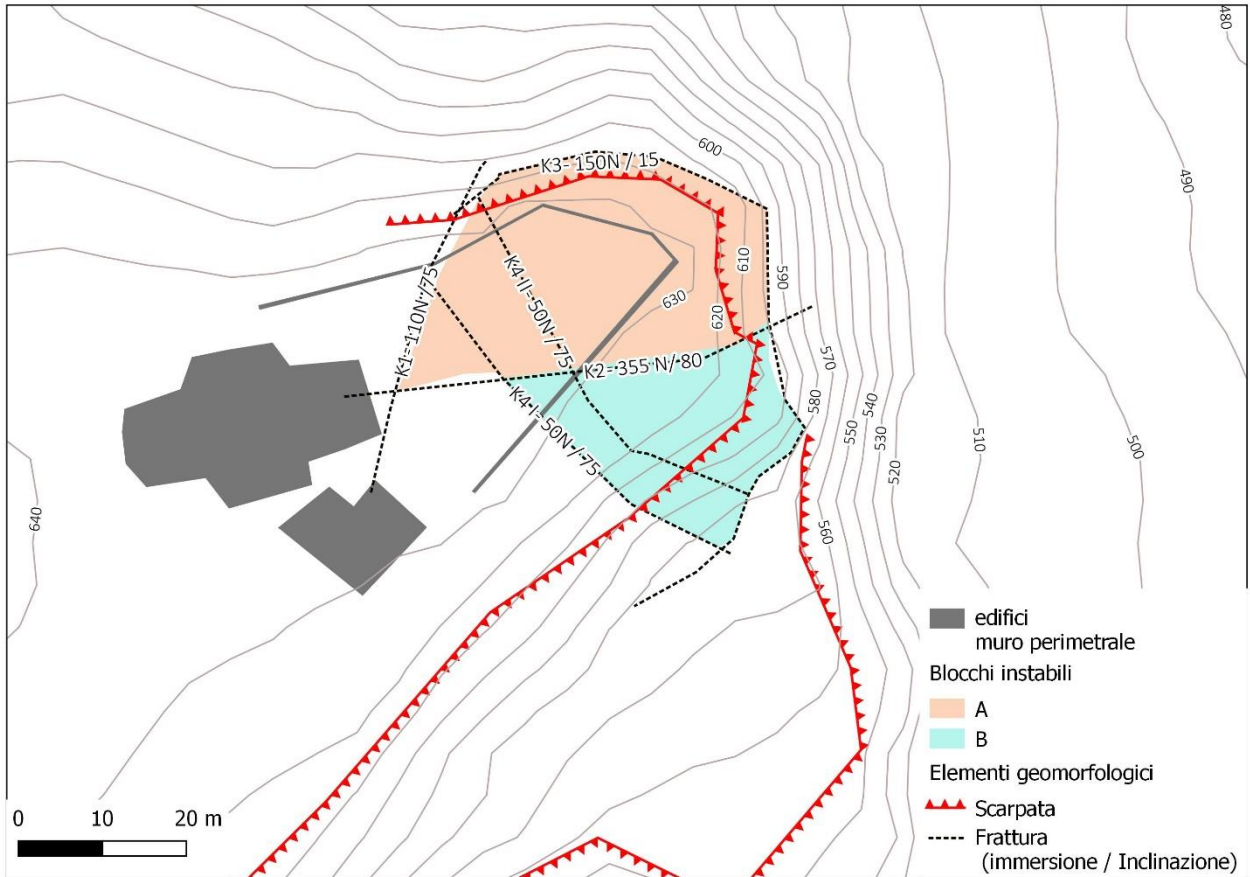


Figura 2.4. Pianta del piazzale e traccia delle principali discontinuità modificato da Lancellota et al (1991)

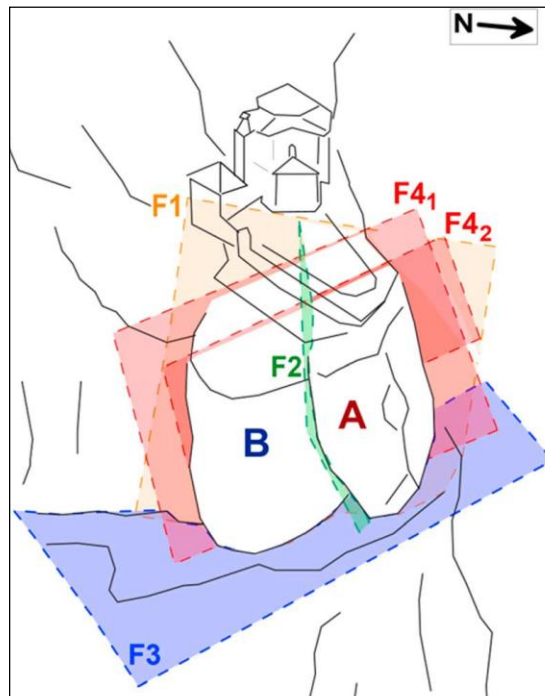


Figura 2.5. Schema 3D dei sistemi di fratture che isolano i blocchi instabili A (12000 m³) e B (7500 m³) da Colombero et al., 2017

4. Notizie storiche di dissesti. Problematiche relative alla stabilità del sito sono emerse già nel secolo scorso soprattutto in relazione attività estrattive nella parete a sud della rupe di Madonna del Sasso, attività definitivamente interrotta nel 1978 (Fonte: La Stampa, 29 luglio 1978). Sono segnalati danni nel piazzale antistante la chiesa nel 1981-82 e nel 1991 legati all'apertura dei sistemi di fratture in superficie.

2.2 Stratigrafie, profili geologici e dati geofisici

Sul sito sono presenti varie indagini geognostiche e geofisiche, riportate in Figura 2.6.

5 Sondaggi geognostici effettuati nel 1981 (Regione Piemonte)

1 Profilo sismico cross-hole (Tesi ed articoli Colombero)

1 Profilo sismico rifrazione (Tesi ed articoli Colombero)

1 Profilo geo-elettrico (Tesi ed articolo Colombero)

Studi di laboratorio su campioni prelevati in sito con il metodo di impulsi and ultrasuoni per determinare le proprietà geomeccaniche e validare i dati dalla sismica.

4 stazioni per il monitoraggio degli eventi microsismici (Tesi ed articolo Colombero) che saranno anche trattate nella sezione monitoraggio attive fra il 2014 ed il 2016.

È presente inoltre un Modello digitale del terreno – Laser Scanner UNITO

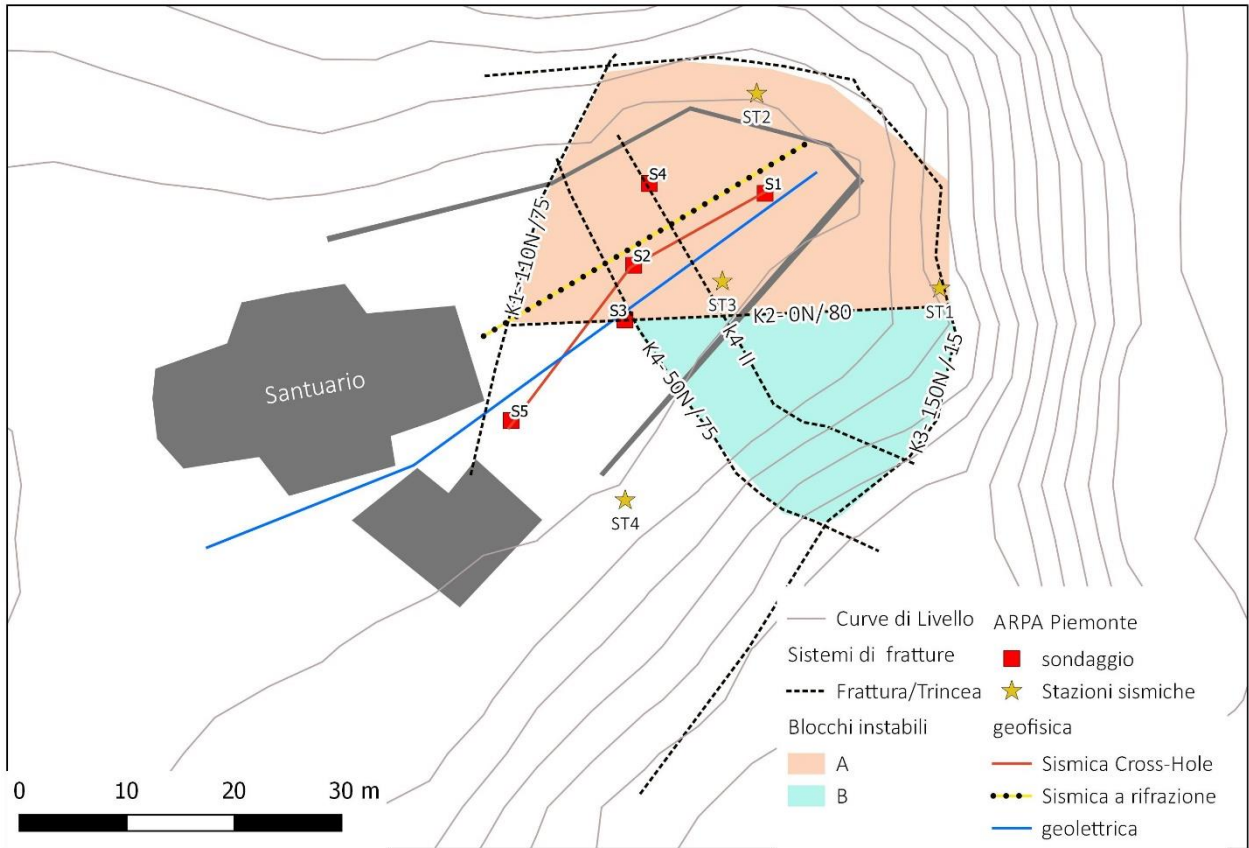


Figura 2.6. Ubicazione dei sondaggi stratigrafici (1981) e delle prove geofisiche effettuate per il lavoro di Colombo et al. (2016 / 2017)

Interpretazione dei dati.

a) Sondaggi geognostici. Sul sito in esame sono presenti diversi sondaggi geognostici realizzati nel 1981 (fino a 50 m di profondità), la stratigrafia dei siti in esame mostra una colonna stratigrafica interamente sviluppata nei graniti dove si rivengono livelli fratturati ed alterati riconducibili ai sistemi di fratturazione che pervadono l'ammasso roccioso (Fig. 2.7 A e E). Per i lavori di Colombo sono stati associati indici RQD (b e f) e velocità delle onde P (c e g) e S (d e H) nei sondaggi S5 es S1, usate dove si sono posizionati i geofoni ricettori della sezione sismica cross-hole. I risultati confermano le zone di debolezza legate alla fratturazione.

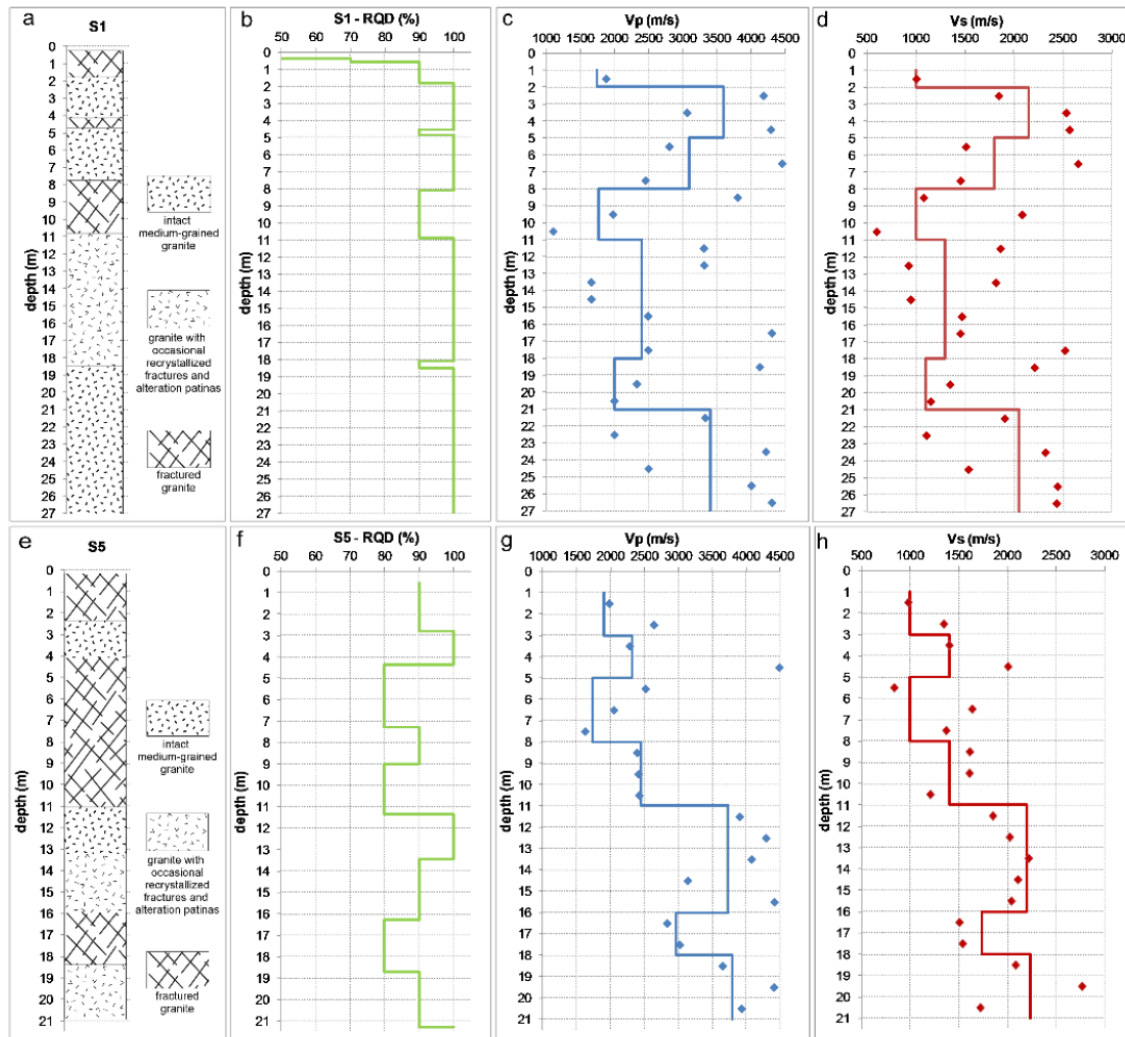


Figura 2.7. stratigrafie dei sondaggi s5 e s1 e relativi indici RQD e velocità delle onde S e P (Tratto da Tesi Colombo, 2017)

b) Prove geofisiche. Nei lavori di Colombo et al., sono state svolte varie prove geofisiche (sismica *cross-hole*, di superficie, rilievi georadar e prove di velocità ad ultrasuoni su campioni di laboratorio. Queste prove hanno permesso di:

- confermare la geometria 3d delle fratture
- ricavare alcune proprietà geo meccaniche,
- dati usati come base per le modellazioni numeriche 3-d sulle vibrazioni e movimenti dei blocchi instabili
- stabilire un modello di velocità per successivo monitoraggio degli eventi microsismici.

Simica Cross-hole e di superficie. La tomografia sismica per una lunghezza di circa 30 m *cross-hole* fatta nella terrazza in fronte alla chiesa (figura 2.8.) ha usato la perforazione centrale s2 come fonte di impulsi sismici mentre nei sondaggi s1 e s5 sono stati installati i geofoni recettori. Il risultato della tomografia ha permesso di individuare i sistemi di fratture K4 (I e II) e k2 dalle

proprietà geomeccaniche più scarse. In generale sono stati individuati valori di velocità delle onde P e S tipici di un ammasso roccioso fratturato per le profondità investigate, anche i blocchi instabili A e B paiono al loro interno pervasi da una serie di fratture. I profili sismici a rifrazione hanno anche permesso di stimare in modo approssimato la profondità di fino alla quale c'è un'apertura delle fratture del sistema k4 (k4I e k42) che raggiungono i 15 ed i 10 metri (Figura 2.8).

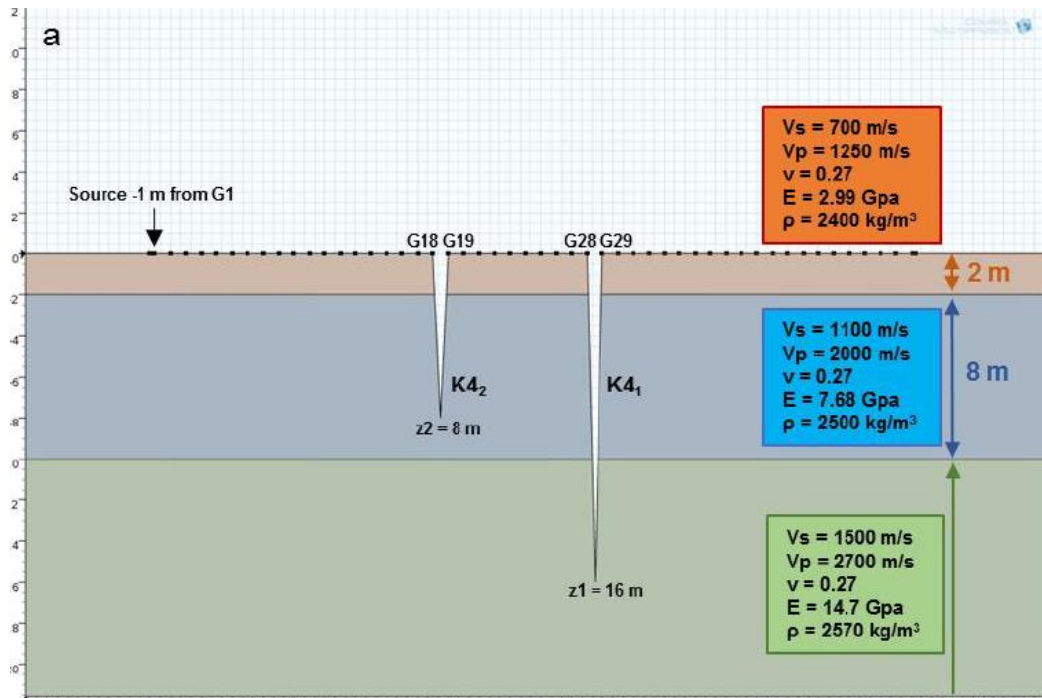


Figura 2.8. Parametri geomeccanici ed apertura stimata delle fratture in base alla sismica a rifrazione di superficie (da Colombo, 2017)

Geoelettrica. Anche il profilo geoelettrico ha mostrato la presenza di zone a bassa conducibilità riconducibili alla presenza dei sistemi fratturazione, tuttavia la loro interpretazione è risultata più complicata rispetto ai dati sismici, anche per via di manufatti antropici nel piazzale della Chiesa

Indagini di laboratorio su campioni. Sempre nel lavoro di Colombo i campioni di roccia prelevati nel sito sono stati studiati per mezzo di impulsi ad ultrasuoni che hanno permesso di stabilire correlazioni utili fra proprietà geomeccaniche e velocità delle onde sismiche.

Grazie ai dati geofisici e di laboratorio è stato possibile ricavare (Fig. 2.9) alcuni parametri dell'ammasso roccioso (resistenza a compressione uniaassiale, porosità, densità secca)

In conclusione secondo Colombo (2017a):

- I dati geofisici sono in accordo con i precedenti studi geomeccanici e le evidenze delle stratigrafie dei sondaggi;
- C'è qualche discrepanza fra la *cross-hole tomography* e le misure in foro
- Tutti i risultati evidenziano la presenza di un **persistente e pervasivo sistema di fratturazione dell'ammasso roccioso che isola le porzioni potenzialmente instabili della falesia.**

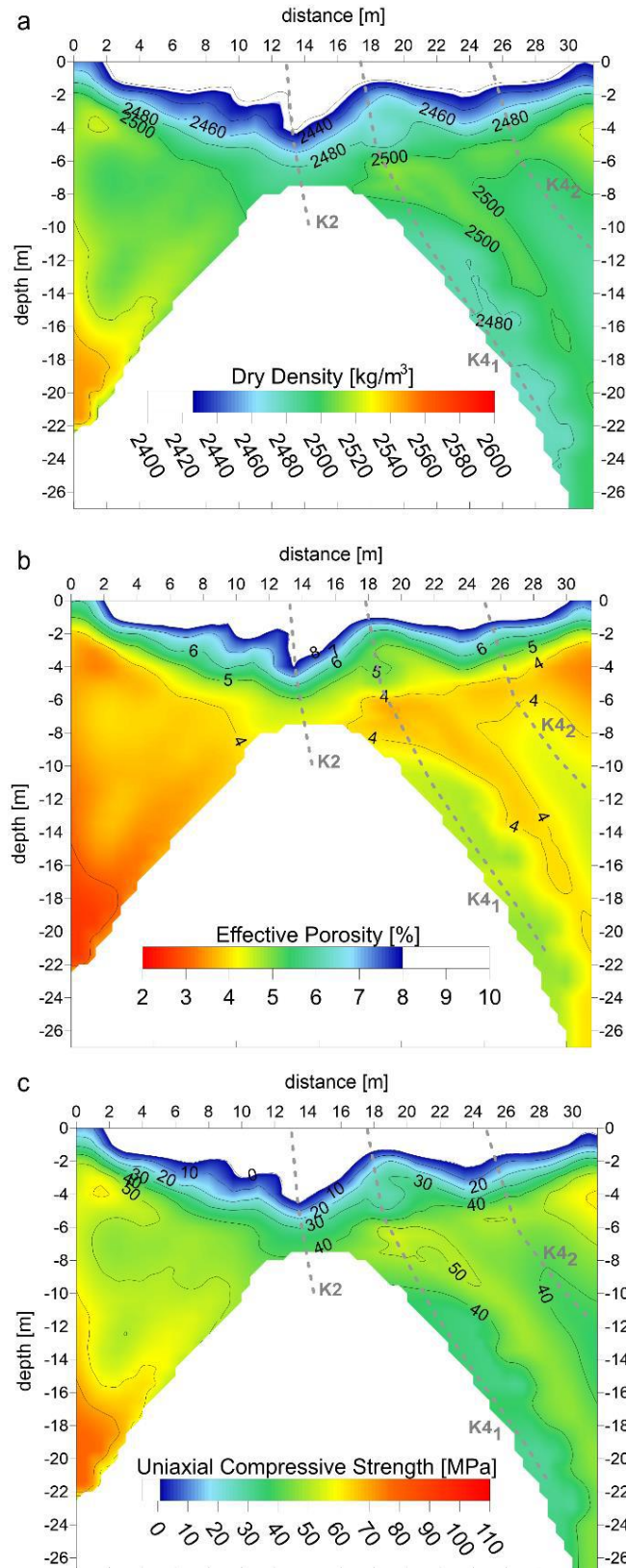


Figura 2.9. Parametri geo-meccanici derivati dai dati geofisici e di laboratorio lungo la sezione S1-S5 (Tesi Colombero, 2017)

2.2 Aspetti relativi a Scenari di rischio e ai Modelli di propensione al dissesto

Gli aspetti relativi alla stabilità del sito sono stati trattati nei lavori di Lacellotta (1991) e Colombero dai quali non emergono condizioni di collassi immediati dei due blocchi rocciosi.

Nello studio di Lacellotta et al 1991 è stata fatta un'analisi cinematica del massiccio roccioso nella quale sono riconosciuti i due blocchi potenzialmente instabili.

*Blocco A è delimitato: a monte dai piani di discontinuità K1 e K4 lateralmente (lato Sud) dal piano di discontinuità K2, e, lato Nord, libero, alla base dal piano di discontinuità K3 (suborizzontale). La porzione rocciosa è **bloccata al piede** ed il cinematisimo si innesca solo nel momento in cui tale supporto viene a mancare. Il volume roccioso che si può mobilitare ha un valore approssimato di 12.000 m³.*

Nell'ambito della zona A si può isolare una sottozona A1 che risulta essere così delimitata: a monte dal piano di discontinuità K4; lateralmente (lato Sud) dal piano di discontinuità K2 e, lato Nord, libero, alla base dal piano di discontinuità K3. Il volume roccioso costituente la sottozona A1 ha un valore 5.000 m³.

Il Blocco B è delimitato a monte dal piano di discontinuità K4 lateralmente (lato Nord) dal piano di discontinuità K2 e, lato Sud, libero alla base dal piano di discontinuità K3. In condizioni statiche lo scivolamento sul piano di base risulta essere potenzialmente ostacolato dall'attrito mobilitato sul piano stesso. Tuttavia non è da escludere che durante lo scivolamento dell'ammasso A, porzioni instabili di dimensioni inferiori possano ricadere sull'ammasso B introducendo azioni che ne possano produrre il ribaltamento. Il volume roccioso costituente la zona B ha un valore approssimato di 7.500 m³.

Modelli numerici dei movimenti dei blocchi e analisi microsismica

Dai lavori di Colombero et al., (2016, 2017a, 2017b) basati su modelli numerici e le analisi delle vibrazioni dei blocchi e degli eventi microsismici non emergono criticità imminenti dei blocchi che possano indurre ad un collasso come già emerso dai lavori precedenti. Si osserva un ciclo stagionale prevalentemente legato alle oscillazioni termiche.

Sono stati individuati gli spettri di risonanza critici per gli ammassi rocciosi (f1, f2 e f3), f1 di solito indica la direzione di scivolamento del blocco instabile e in questo caso ha una direzione che impedisce il movimento del blocco A che fermato dal blocco B (Fig. 2.10).

Si nota che il comportamento di A e B tende ad essere simile nei mesi caldi quando l'espansione termica chiude le fratture mentre più indipendenti nei mesi freddi.

I principali meccanismi di movimento, identificati tramite i modelli numerici 3d sono: (Fig. 2.11)

- Scivolamento e flessione parallelo a k4 del blocco A (f1 2.3 – 2.7 hz) con un effetto di torsione lungo l'intersezione fra fratture k4 e k2 (f3 – 5.6 - 6.4 Hz) maggiore nel gruppo A

- F2- Scivolamento e flessione lungo la frattura k2, perpendicolare a k 4 maggiore nel blocco B

Inoltre si possono trarre le seguenti conclusioni:

“L’opposta orientazione della vibrazione f1 in A e B descrive il ciclo di apertura e chiusura delle fratture in A e B legate alla temperatura; mentre f3 descrive il comportamento del settore A mentre f2 quello del settore B.”

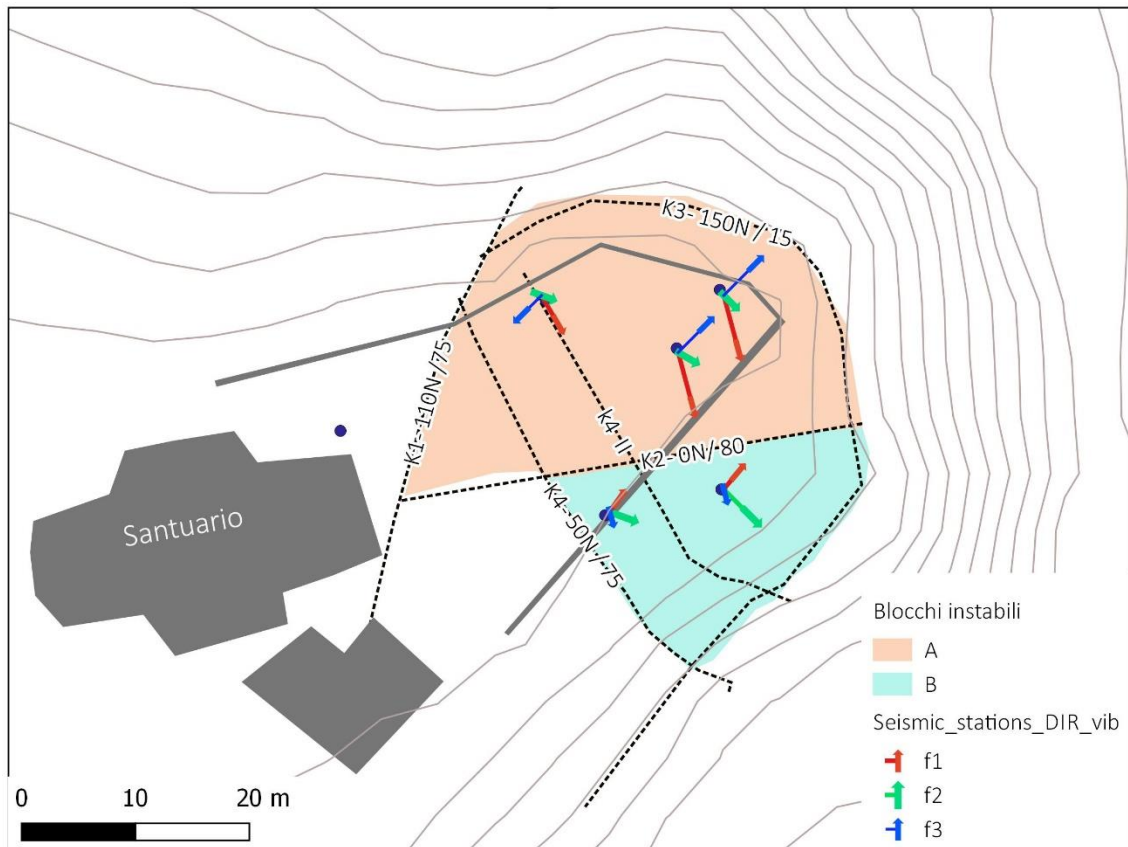


Figura 2.10. direzione di vibrazioni critiche dell’ammasso da Colombo et al., 2017

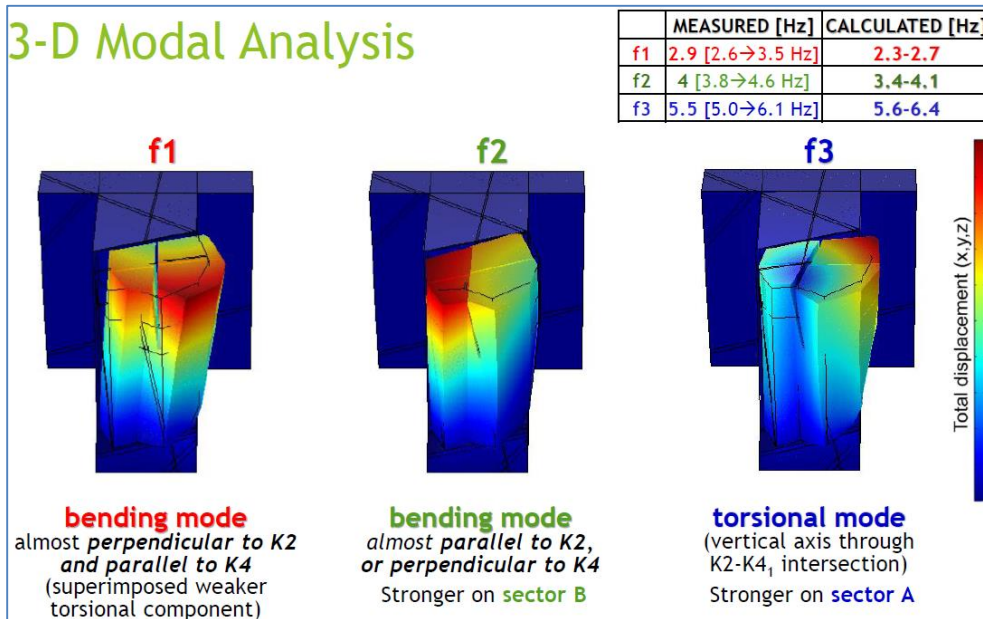


Figura 2.11. Modelli numerici 3-d dei movimenti dei blocchi instabili: f1 – flessione parete a k4 e perpendicolare a k2 che interessa il settore A; f2 flessione parallela a k2 e perpendicolare a k4 che interessa; f3 rotazione che interessa principalmente il blocco instabile a (da presentazione tesi Colombo, 2017)

Rilevato paramassi: Nella relazione di ARPA Piemonte nel 2017 viene anche descritto il rilevato paramassi (Fig. 2.12) realizzato nei primi anni '90 a protezione degli elementi antropici (una decina di fabbricati, una strada comunale):

Trattenere in toto volumi rocciosi dell'ordine dei volumi totali stimati per le porzioni A e B è ovviamente impossibile. In fase di progetto venne prese in considerazione il fatto che, in fase di primo impatto alla base del versante, i volumi principali si frantumerebbero seguendo i sistemi di frattura esistenti; il che ha portato a stimare in circa 500 m³ i volumi unitari che potrebbero impattare il rilevato. Considerata l'energia in gioco, comunque enorme, il progetto ha previsto la realizzazione di un rilevato con antistante vallo, di altezza 8 m e lunghezza 160 m adoppia sezione trapezia ; il nucleo a monte è rinforzato con tessuto in polipropilene, quello a valle è costituito da semplice terra compattata.

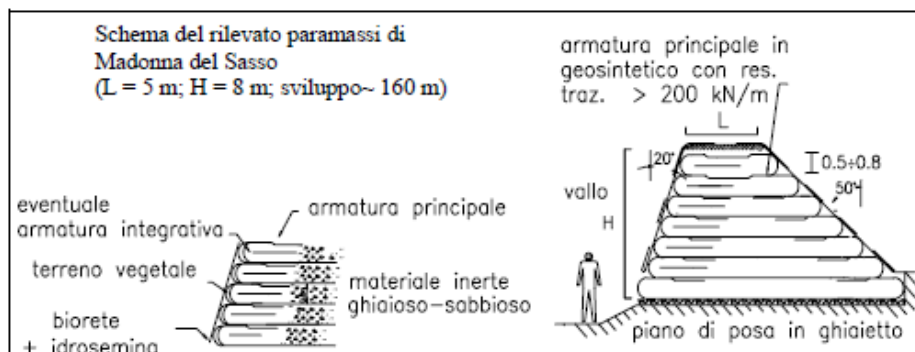


Figura 2.12. Schema del rilevato paramassi

3 Sistemi di monitoraggio. Dati ed analisi

3.1 Storia degli strumenti di monitoraggio presenti sul sito

Nel sito di Madonna del Sasso sono attualmente attivi e gestiti da ARPA Piemonte:

- 4 capisaldi topografici ottici attivi dal 2006, installati sul muro perimetrale del piazzale e con punto di riferimento stabili nei pressi della chiesa. La frequenza di lettura dati è semestrale circa;
- 2 basi distanziometriche attive dal 2007, installate sul lato Nord in prossimità delle fratture k4, con lettura dati annuale od ogni due anni circa;
- 2 basi fessurimetriche, installate dal 2012 con lettura dei dati semestrale circa.

Nel passato sono stati anche presenti:

- 3 Inclinometri (gestione Regione / ARPA Piemonte) installati nel 1981 e attivi fino a fine anni'90 circa
- 10 misuratori di giunti, posti nelle fratture k1 e k2 a differente profondità (Regione / ARPA Piemonte) attivi fra il 1991 ed il 1994
- 2 Estensimetri di superficie (ARPA Piemonte) attivi fra il 2007 ed il 2010
- 4 Stazioni per il rilevamento degli eventi micro-sismici utilizzate per i lavori di Colombero et al

Nella figura 3.1 è mostrata l'ubicazione degli strumenti di monitoraggio nel sito in esame (ad eccezione dei misuratori di giunti).

È presente sul sito anche dato radar interferometrico InSAR: dataset ERS 1994-2000 e Radarsat 2003-2009 processato per ARPA Piemonte, da TeleRilevamento Europa. I dati sono disponibili dalle geometrie ascendenti tuttavia in entrambi i dataset è presente un solo riflettore *persistent scatterer* (PS) nell'area dei blocchi instabili, mentre altri PS sono in corrispondenza dell'edificio della chiesa del detrito di versante ai piedi della parete.

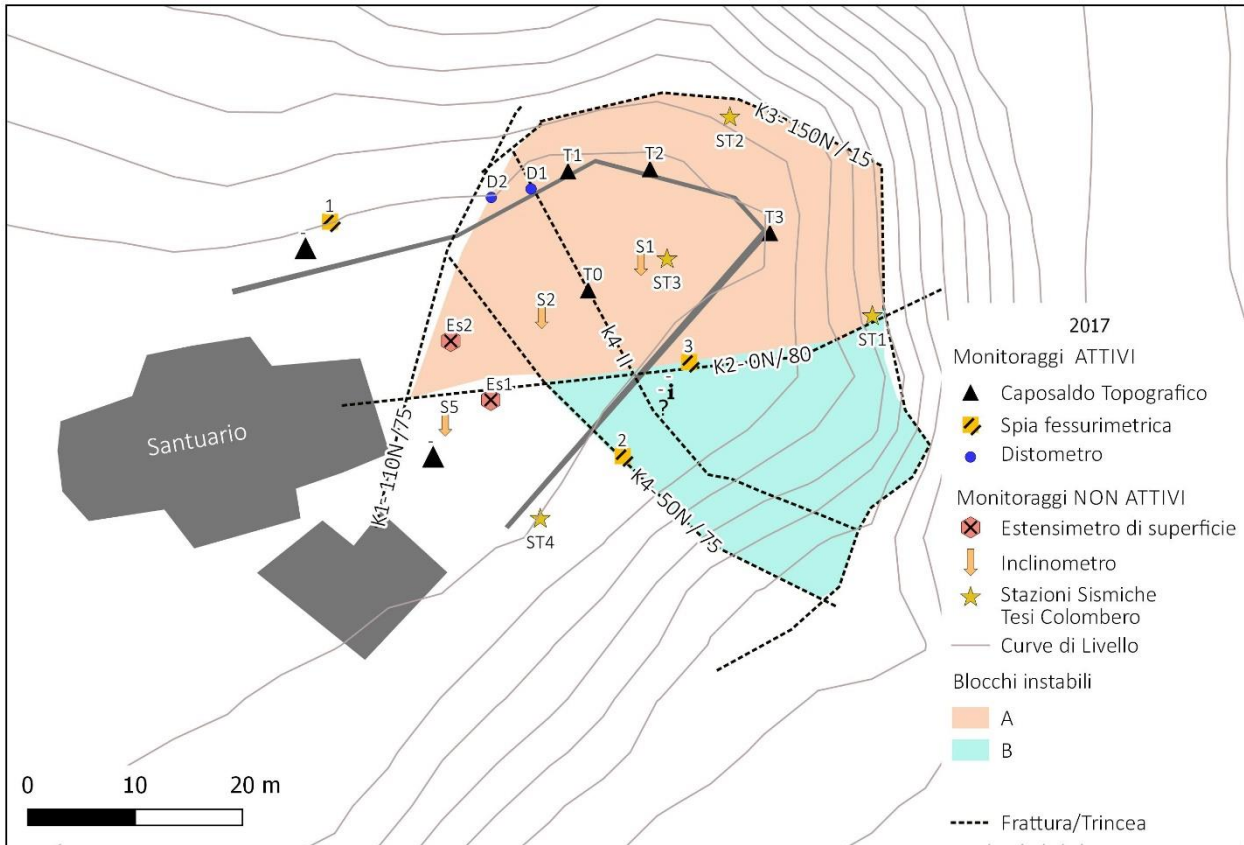


Figura 3.1. Ubicazione degli strumenti di monitoraggio di ARPA Piemonte e delle stazioni sismiche realizzate per la resi di Colombero.

3.2 Aspetti relativi all'analisi delle reti di monitoraggio

3.2.1 Strumenti di monitoraggio non più attivi

1. Le misure inclinometriche attive fino alla fine degli anni'90 hanno non hanno mostrato significativi spostamenti, solo un inclinometro (s2) sembra registrare movimenti verso E a 11 m di profondità (Fig. 3.2). In generale questa strumentazione non risulta adatta al monitoraggio di questo tipo di fenomeno.
2. I misuratori di giunti installati (Fig. 3.3 e Fig. 3.4) dalla Regione Piemonte lungo le fratture k1 e k2 tra il 1991 ed il 1994 hanno mostrato un comportamento legato alle temperature con apertura delle fratture in inverno per la contrazione del massiccio roccioso ed una chiusa in estate per l'espansione termica del massiccio roccioso. I movimenti sono maggiori verso la sommità rispetto alla base delle fratture. Al termine

- dei cicli annuali osservati le fessure hanno mantenuto un'apertura residua con valore sino a 2 mm/a
3. Estensimetri. Attivi sul piazzale della chiesa fra il 2007 ed il 2010 hanno mostrato oscillazioni minime legato ai cicli di espansione termica (Fig. 3.5).
 4. Stazioni per il rilevamento di eventi micro-sismici (Tesi Colombero, 2017). Nei lavori di Colombero si sono registrati gli eventi microsismici tra il 2014 e 2016 (Fig. 3.6). Le evidenze mostrano eventi maggiori in estate legati a precipitazioni e minori in inverno legati alle temperature, sono eventi superficiali legati ai cicli di espansione/contrazione termica e non a eventi profondi legati a rotture di ponti o al piede del massiccio roccioso. Non sono quindi sintomo di un processo irreversibile verso un possibile collasso.
 5. Infine il dato interferometrico InSAR che conta un solo punto nella zona potenzialmente instabile per i dataset ERS (1994 – 2000) e Radarsat (2003 – 2009) nella geometria ascendente. Il dato quindi non può essere considerato molto affidabile tuttavia è significativo che il movimento registrato sia paragonabile a quello registrato dalle stazioni topografiche (Fig. 3.7) I PS presenti sull'edificio e sugli accumuli detritici sottostanti non mostrano invece significativi movimenti

Tabella 3.1. strumentazione non più attiva nel sito sintesi delle misure

Strumento	N	Periodo	Note
Inclinometri	3	1981-2000	Dislocazioni minime, legate alle variazioni termiche stagionali
Misuratori di giunti	10	1991-1994	Dislocazioni legate in parte alle variazioni termiche stagionali con componente residua di circa 2 mm/anno
Estensimetri	2	2007 - 2009	Dislocazioni minime, legate alle variazioni termiche stagionali
Stazioni per rilevamento Eventi microsismici	4	2014-2016	Gli eventi sembrano essere correlati alle oscillazioni termiche soprattutto nei periodi invernali mentre con alle precipitazioni nei periodi più temperati, non mostrano una tendenza a rotture irreversibili.
Dato PS ERS/Radarsat	1	1994-2010	Il dato conta un solo PS nella zona dei blocchi instabili, per tanto poco significativo, anche se i movimenti registrati fra 2 e 5 mm/anno sono compatibili con le misure topografiche

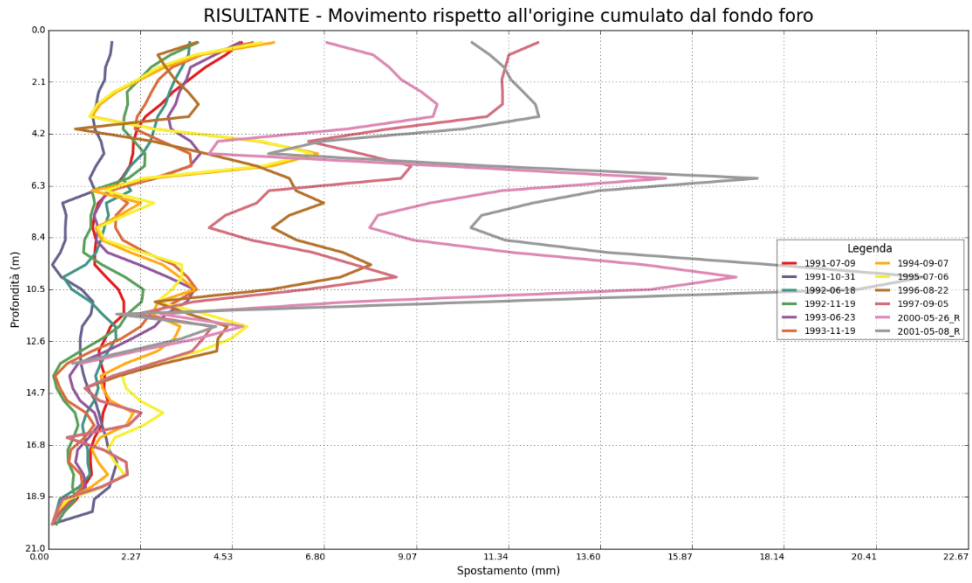


Figura 3.2. Inclinometro s2 (Codice ARPA P.: I7MDSA1) movimento registrati tra il 1991 ed il 2000

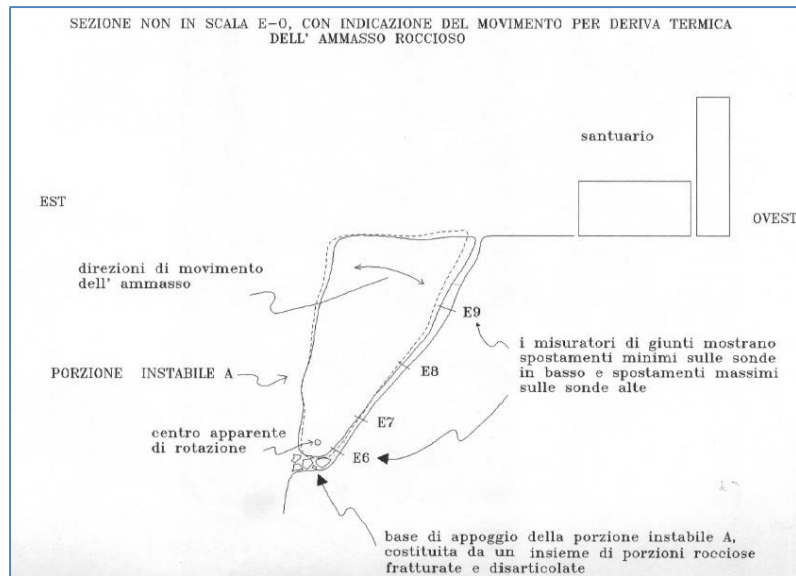


Figura 3.3. Relazione Regione Piemonte 1993: interpretazione schematiche dei movimenti registrati dai misuratori di giunti

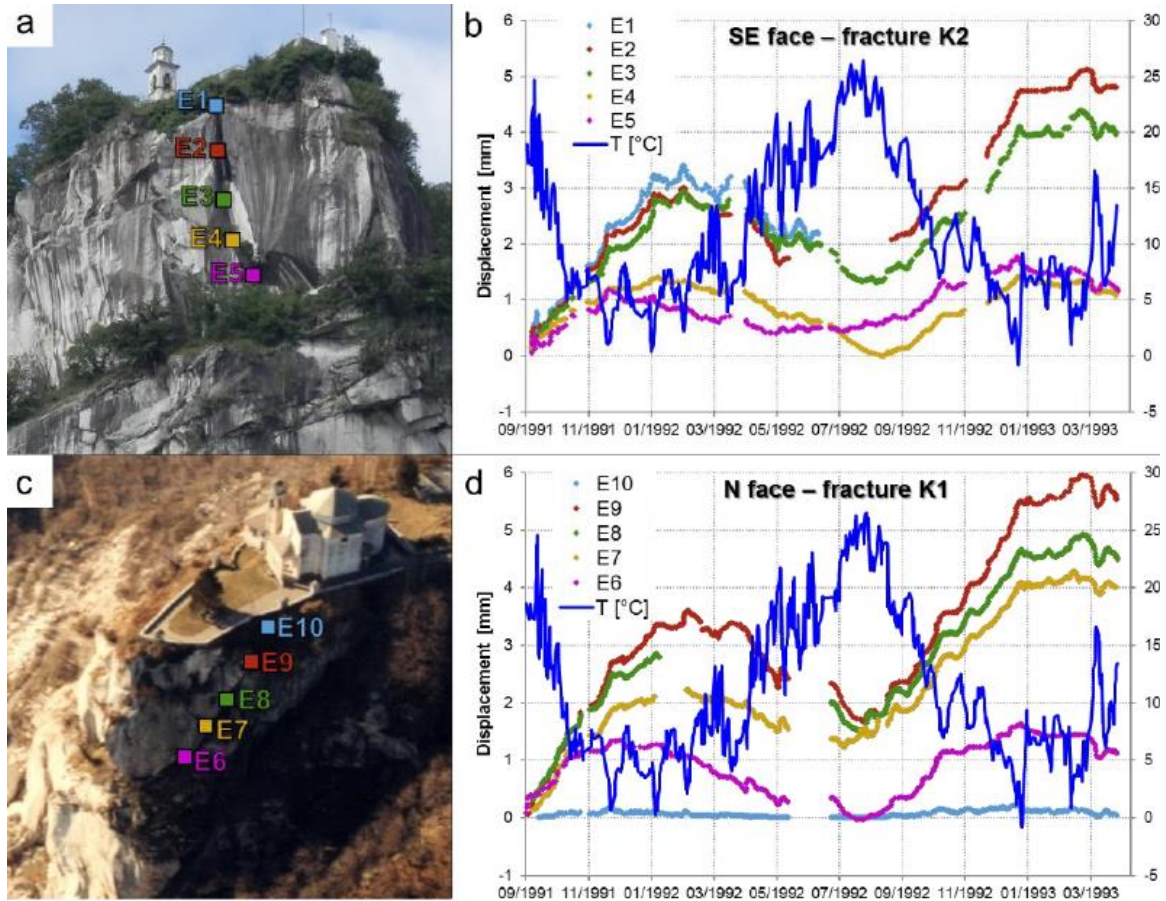


Figura 3.4. spostamenti registrati dai misuratori di giunti durante il periodo 1991-1993 comparati con le temperature (rielaborazione tesi Colombero, 2017b)

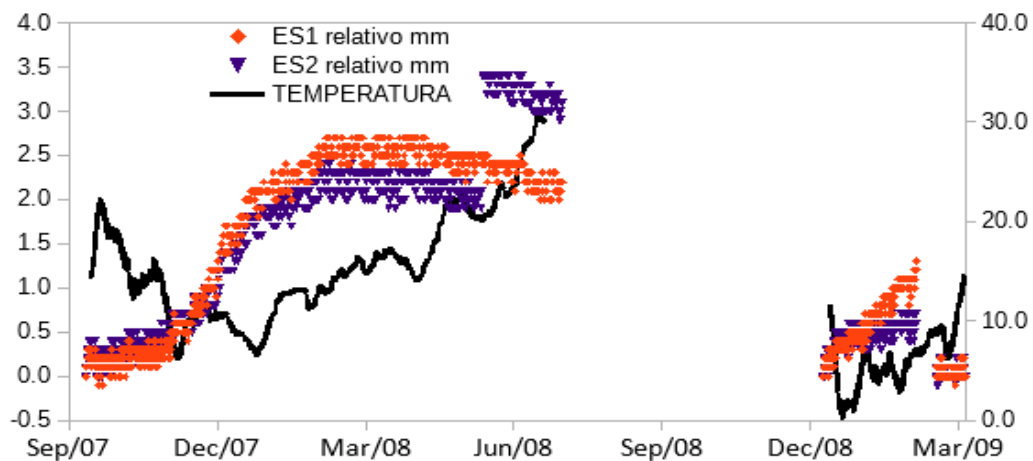


Figura 3.5. spostamenti registrati dagli estensimetri di superficie tra il 2007 ed il 2009 comparati ai dati di temperatura (ARPA Piemonte)

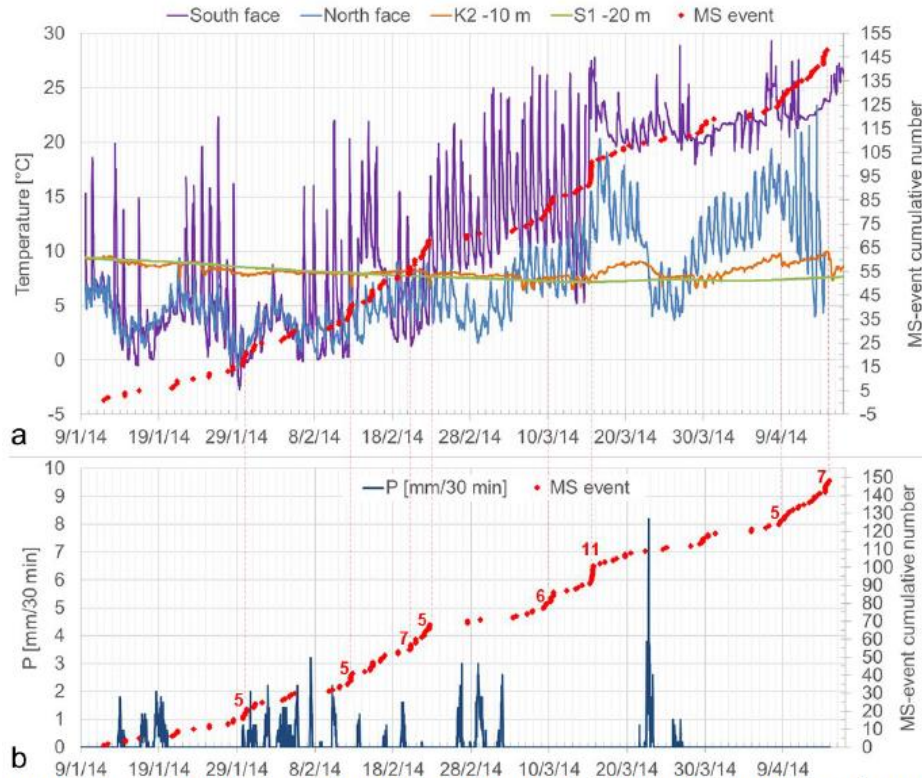


Figura 3.6. Eventi micro-sismici cumulati e registrati tra gennaio e aprile 2014 comparati con: A) Temperature dei blocchi A e B, e fratture k2 e sondaggi s1; B) Precipitazioni (da figura 5.31 Tesi Colombo, 2017a)

3.2.2 Analisi degli strumenti attualmente attivi

Caposaldi topografici. Dalla relazione ARPA Piemonte relativa alle letture del giorno 31/03/2017:

- Caposaldo T1-ctm1: il punto risulta aver subito uno spostamento planimetrico di circa 2 mm verso N-NE; lo spostamento complessivo del caposaldo, rispetto alla misura d'origine (febbraio 2006) è di **20 mm verso E-NE mentre l'abbassamento è di 33 mm;**
- Caposaldo T2-ctm2: il punto risulta aver subito uno spostamento planimetrico verso N-NE di circa 2 mm e un abbassamento di circa 8mm; lo spostamento complessivo del caposaldo, rispetto alla misura d'origine (febbraio 2006) è **di 39 mm verso E-NE, mentre l'abbassamento è di 31 mm;**
- Caposaldo T3-ctm3: il punto risulta aver subito uno spostamento planimetrico verso N-NE di circa 8mm e un abbassamento di circa 10mm; lo spostamento complessivo del caposaldo, rispetto alla misura d'origine (febbraio 2006) è **di 32 mm verso E-NE, mentre l'abbassamento è di 28 mm;**
- Caposaldo T0-ctm4: il punto risulta aver subito uno spostamento planimetrico verso N-NO di circa 4mm e un abbassamento di circa 8mm; lo spostamento complessivo del caposaldo, rispetto alla misura d'origine (febbraio 2006) è **di circa 38 mm verso E-NE mentre l'abbassamento è di 34 mm.**

Fessurimetri. (letture marzo, 2017 ARPA Piemonte) *Rispetto alla misura d'origine (aprile 2012) si segnala quanto segue:*

- fessurimetro **F2**: lieve apertura con incremento di circa 0.5 mm nella componente orizzontale e circa 1.5 mm nella componente verticale;
- fessurimetro **F3**: nessuna variazione significativa.
- fessurimetro **F1**: divelto nel 2013.

Distometri. (ultimo aggiornamento, letture novembre 2015 ARPA Piemonte)

- base distanziometrica **D1**: la recente misura non evidenzia alcuna significativa variazione rispetto alla lettura di origine (febbraio 2009).
- base distanziometrica **D2**: benché gli spostamenti registrati siano oggettivamente di modesta entità, i dati evidenziano una lenta e progressiva apertura della frattura posta sotto osservazione (2 cm circa rispetto alla lettura di origine)

Tabella 3.2 sintesi delle misure degli strumenti attualmente attivi

Strumento	N Periodo	Note
Caposaldi topografici	4 2006 - 2017	Movimenti stagionali legati alle temperature; e movimenti del blocco A verso NE e scivolamento verso il basso con velocità medie fra 2 – 4 mm/anno
Fessurimetri	2 2012-2017	Solo un fessurimetro mostra un'apertura di pochi mm
Basi distanziometriche	2 2007-2015	Una base distanziometrica mostra movimenti cumulati sui 2 cm tra il 2007 ed il 2015, una media di 2.5 mm/annui.

“Il sistema di monitoraggio del sito ha evidenziato una evoluzione del fenomeno, soprattutto per le porzioni più esposte a E-ESE, ovvero quelle più suscettibili alle escursioni termiche che governano i movimenti del fenomeno franoso, come appurato anche dal controllo microsismico eseguito in questi anni dal Dipartimento di Scienze della Terra dell’Università di Torino e presentato ai rappresentanti della Regione Piemonte e delle Amministrazioni Comunali interessate il 18 maggio scorso. Gli spostamenti plano-altimetrici sono coerenti con il modello concettuale del fenomeno franoso, definito dai vari studi pregressi, che complessivamente si sviluppa con un lieve, seppur costante, spostamento in direzione ENE e lievi abbassamenti”.

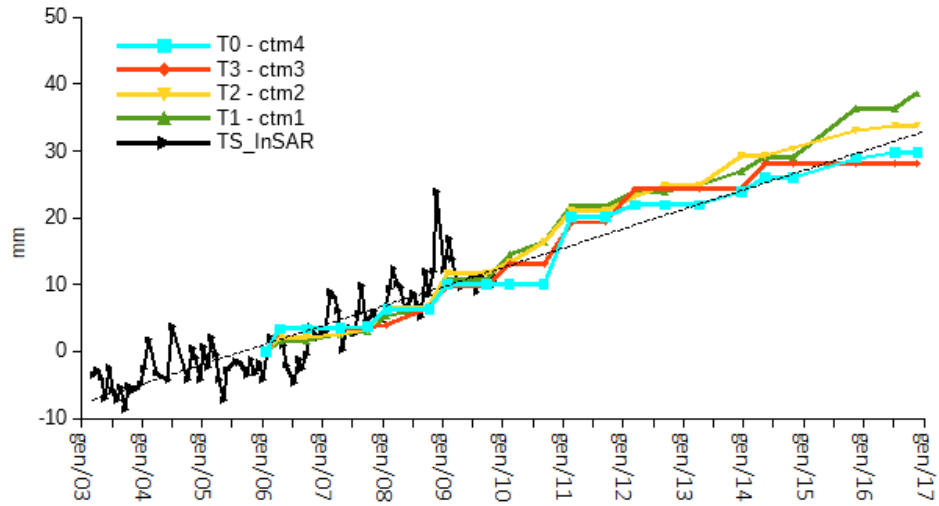


Figura 3.7. Capisaldi topografici: Spostamenti totali (3d) cumulati aggiornati al dicembre 2016 comparati con la serie storica del PS Radarsat ascendente presente sul sito (ARPA Piemonte)

Diagramma polare degli spostamenti medi sul piano XY (mm)

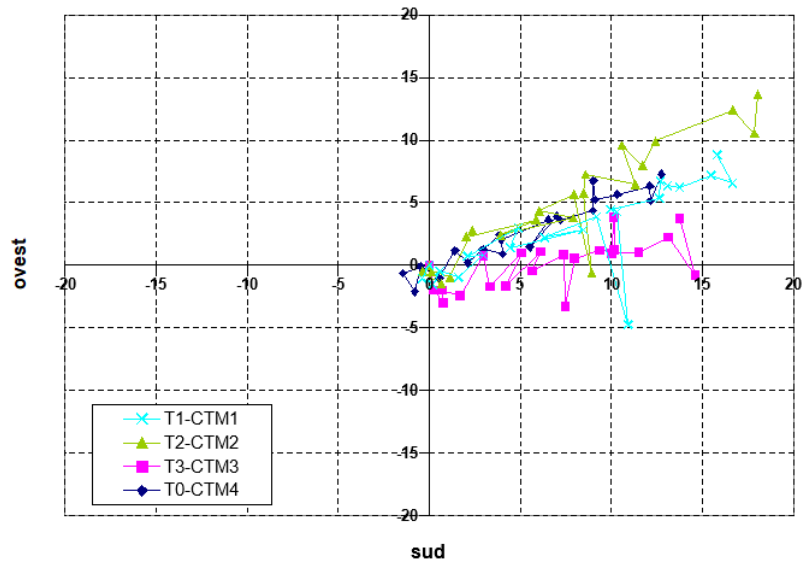


Figura 3.8. Capisaldi topografici: Spostamenti orizzontali cumulati aggiornati al dicembre 2016 (ARPA Piemonte)

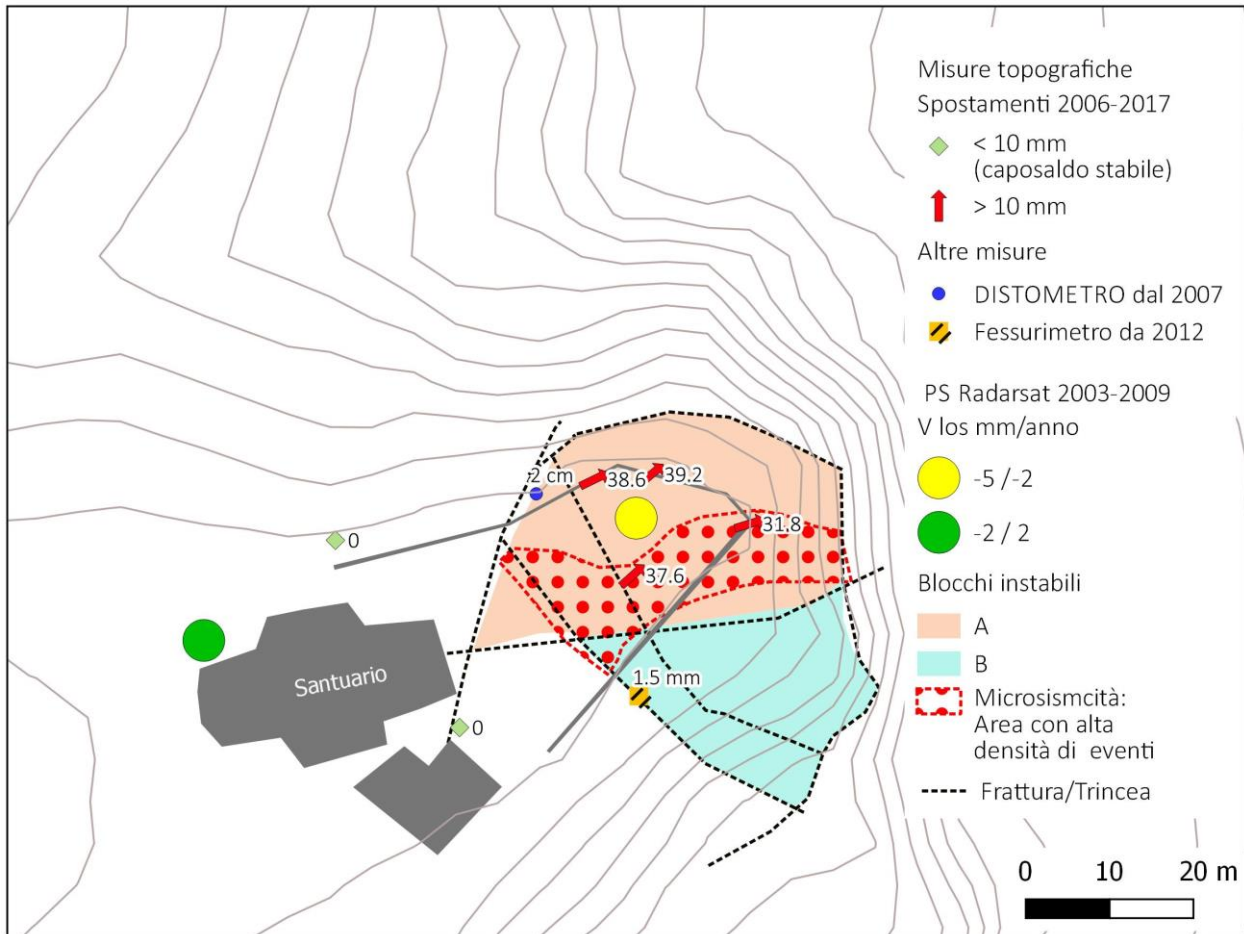


Figura 3.9. Sintesi delle misure di monitoraggio sul sito di Madonna del Sasso

3.3 Sistema di monitoraggio nell'ambito del progetto corrente.

Nell'ambito del progetto *“attività di ricerca e sviluppo sulle tecnologie e strumenti della geomatica per il monitoraggio di versanti in dissesto e infrastrutture”* ad inizio maggio 2018 sono stati eseguiti:

- Installazione due centraline multi-sensore alle estremità della rupe, utilizzando i pilastri già presenti per il monitoraggio, per monitoraggio in continuo di posizioni e inclinazioni;
- stazionamento con GNSS per inquadramento campagna di zero sul pilastro di posa di marker per volo fotogrammetrico bassa quota e rilievo con stazione totale;
- volo bassa quota (< 20 m) con drone DJI Phantom, per modello 3D ad alta risoluzione (Fig. 3.12)

A luglio 2018 è stato effettuato un secondo volo con drone DJI Phantom

Il confronto fra DSM derivati dal volo drone e il dato GNSS alla data attuale (ottobre 2018) non

permette di avere una misura ancora significativa.

PILASTRINO 12: installata la centralina n.4:

- i dati dell'accelerometro (accelerometer_MS_A) sono reperibili in: https://userportal.smartdatanet.it/userportal/#/dashboard/stream/csp/1ab3e06f-f021-43aa-ad01-e04132c0e76e/accelerometer_MS_A;
- i dati di temperatura T, umidità H carica batteria V (telemetry_MS_A) sono reperibili
- in: https://userportal.smartdatanet.it/userportal/#/dashboard/stream/csp/1ab3e06ff021-43aa-ad01-e04132c0e76e/telemetry_MS_A
- i dati GNSS sono trasmessi in RTCM3 da un server TCP all'indirizzo: SERVER ADDRESS: 194.116.57.12 PORT: 11005

PILASTRINO 14: installata la centralina n.2:

- i dati dell'accelerometro (accelerometer_MS_B) sono reperibili in: https://userportal.smartdatanet.it/userportal/#/dashboard/stream/csp/1ab3e06f-f021-43aa-ad01-e04132c0e76e/accelerometer_MS_B
- i dati di temperatura T, umidità H, carica batteria V (telemetry_MS_B) sono reperibili in: https://userportal.smartdatanet.it/userportal/#/dashboard/stream/csp/1ab3e06ff021-43aa-ad01-e04132c0e76e/telemetry_MS_B
- i dati GNSS sono trasmessi in RTCM3 da un server TCP all'indirizzo: SERVER ADDRESS: 194.116.57.12 PORT: 11002



Figura 3.10. Ubicazione centraline multi-sensore



Figura 3.11. volo bassa quota (< 20 m) con drone DJI Phantom

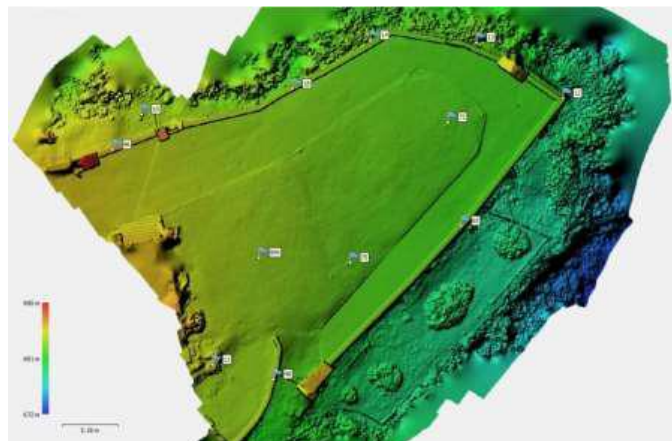


Figura 3.12. DSM del piazzale ottenuto dai dati UAV.

4 Sintesi e proposte di integrazione

In base a quanto presentato nei capitoli precedenti ed edotto dall'analisi di tutta la documentazione disponibile, è possibile tracciare un quadro di sintesi esaustivo sulla frana di Madonna del Sasso

4.1 Analisi dei lavori pregressi.

Il quadro del dissesto di Madonna del Sasso a partire dallo studio di Lacellotta (1991), i monitoraggi di ARPA e Regione Piemonte, fino a quelli di Colombero et al., (20161 -2017) si è delineato in maniera sempre più chiara. Le principali caratteristiche del sito possono essere definite dai seguenti punti:

- L'esistenza di un sistema di 4 fratture che isolano due blocchi (A sul lato a Nord e B sul lato a Sud) potenzialmente instabili, ma che non sono attualmente a rischio di collasso parossistico perché bloccati al piede. Su una scala di tempo più lungo tuttavia la stabilità non è garantita per via della elevata fratturazione del massiccio;
- L'apertura delle fratture è maggiore verso la superficie, dove causano anche danni alle strutture (pavimentazione e muro di cinta) con i cicli di espansione e contrazione.
- Il massiccio roccioso è soggetto a cicli di espansione e contrazione che sono collegati alle temperature, questo comporta una maggiore apertura delle fratture nei periodi freddi ed una maggiore chiusura in quelli caldi. Il comportamento dinamico dei blocchi in base ai modelli numerici ed all'analisi delle vibrazioni tende ad essere differenziato in inverno ed omogeneo in estate;
- Il blocco A (quello a Nord) presenta un movimento cumulato, che lo porta a spostarsi verso NE e verso il basso di qualche mm/anno con una componente di torsione maggiore in cima che non la fondo.
- le analisi degli eventi microsismici sembra mostrare una correlazione con i cicli di espansione e contrazione termica e alle precipitazioni. Gli eventi distribuiti nella parte superficiale (in particolare lungo la frattura k2 che divide i blocchi A e B) paiono essere collegati alla fratturazione termica e non sono legati ad una evoluzione pre-collasso, per il periodo di osservazione;

4.2 Analisi del sistema di monitoraggio

A partire dai primi anni '80 il sito di Madonna del Sasso è stato soggetto a monitoraggio con diversi sistemi alcuni si sono rivelati maggiormente efficaci rispetto ad altri:

- Le misure dei capisaldi topografici si sono dimostrate efficaci nel monitorare gli spostamenti stagionali e cumulati del blocco A, che raggiungono alcuni mm/anno. non ci sono capisaldi nel settore B
- Le misure inclinometriche per il tipo di movimento registrato di Madonna del Sasso non sono uno strumento adatto anche se un inclinometro aveva individuato un movimento in direzione compatibile con le misure topografiche;
- Estensimetri di superficie e fessurimetri non hanno dato significativi risultati;
- Una misura distometrica sembra essere in linea con le misure topografiche;
- I misuratori di giunti si sono rilevati utili per monitorare i cicli di espansione e contrazione dell'ammasso roccioso, ma sono stati attivi per poco tempo.
- Il dato PS con un solo punto non può essere considerato molto affidabile, tuttavia se i nuovi sensori come Sentinel-1 garantiscono
- Le analisi degli eventi micro-sismici hanno contribuito a migliorare la dinamica di movimento dei blocchi, un miglioramento dei modelli e dei sistemi di rilevamento potrebbe essere usato come un sistema per rilevare eventuali

Suggerimenti per un miglioramento del monitoraggio:

- Misure GPS in continuo con sensori a basso costo per una serie storica più precisa del movimento dei blocchi;
- Aggiungere 1 o 2 caposaldi topografici anche nel blocco B
- Ripristinare i misuratori di giunti nelle fratture
- Misure di fessurimetri e distometri non sono indispensabili
- Un'altra campagna di monitoraggio degli eventi microsismici.

Geohazard Monitoring Group



**GEOHAZARD
MONITORING
GROUP**



Geohazard Monitoring Group
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica - IRPI
Consiglio Nazionale delle Ricerche - CNR
Strada delle Cacce, 73, 10135 Torino, Italy
Phone: +39-011-3977-811, fax: +39-011-3977-821
E-mail: geomonitoraggi@irpi.cnr.it
<http://gmg.irpi.cnr.it>