

Servizio Area Romagna dell' Agenzia regionale
per la sicurezza territoriale e la protezione civile

Il crollo del versante nord della Rupe di San Leo del 27 febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza

di Claudio Corrado Lucente
funzionario geologo del Servizio Area Romagna
(ex Servizio tecnico di bacino Romagna)

Articolo pubblicato su:
Il Geologo dell'Emilia-Romagna
Anno XIV, Numero 52

Il crollo del versante nord della Rupe di San Leo del 27 febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza

1. Introduzione	pag. 6
2. Inquadramento geologico - geomorfologico	“ 7
3. Il crollo del 27 febbraio 2014	“ 9
4. Lo studio multidisciplinare	“ 10
4.1 Rilievo con Laser scanner terrestre	“ 10
4.2 Rilievo con drone e ortofotogrammetria	“ 11
4.3 Rilievo geomeccanico	“ 11
4. 4. Sondaggio profondo	“ 13
5. Monitoraggio	“ 14
5.1 Monitoraggio di fase 1	“ 14
5.2 Monitoraggio di fase 2	“ 18
6. Analisi di stabilità	“ 19
7. Gli scenari di rischio	“ 20
8. Conclusioni	“ 21
Ringraziamenti	“ 22
Bibliografia	“ 22

Il crollo del versante nord della rupe di San Leo del 27 febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza

Claudio Corrado Lucente

Geologo | funzionario del Servizio Tecnico di Bacino Romagna - Rimini - Regione Emilia-Romagna

1. Introduzione

L'area su cui insiste l'abitato di San Leo è storicamente nota per il succedersi di numerosi e, a volte, disastrosi eventi franosi, riportati in documenti storici e rappresentazioni pittoriche (Benedetti et al., 2011; Nesci & Guerra, 2013). Anche di recente San Leo è stato oggetto di dissesti importanti che hanno interessato i bordi della rupe insistenti sui due fossi di Seripa e Campone, che incidono profondamente le argille policrome su cui "galleggia" la placca di San Leo. In diverse occasioni è stata colpita la storica fortezza e più volte si è assistito a crolli lungo il versante sud della Rupe che hanno minacciato la sicurezza dell'abitato e dell'unica via di accesso all'abitato stesso, aree da ritenersi a elevata vulnerabilità.

L'ultimo crollo in ordine di tempo, avvenuto tra le ore 17.50 e 18.00 del 27 febbraio 2014, si aggiunge alla lunga serie di fenomeni franosi che continuano a minacciare l'integrità dell'ammasso roccioso e con esso la sicurezza della città di San Leo. Il crollo ha interessato un'ampia porzione della Rupe di San Leo sul versante nord (spigolo nord-est), poco lontano dal precedente crollo del 2006.

Il crollo febbraio 2014 aggiunge un fatto nuovo nella gestione del rischio dell'intera rupe di San Leo poiché prima di tale evento, il versante nord non era ritenuto una zona a rischio alla stessa stregua dei versanti sud ed est, poiché gli elementi a rischio si limitavano al depuratore e alla strada circonvallazione di San Leo. Oggi invece, avendo la frana generato un arretramento del ciglio della rupe tale da avvicinarsi alle abitazioni civili, anche il lato nord ha assunto una connotazione di alta vulnerabilità e rischio elevato.

Il mattino successivo al crollo (28 febbraio 2014) furono fatte le prime verifiche sul terreno e dall'alto, con l'impiego di elicottero (messo a disposizione dal comando dei vigili del fuoco) per determinare, in via preliminare,

l'estensione del fenomeno franoso e valutare l'area a rischio. Al tavolo tecnico per le valutazioni hanno preso parte, oltre al Servizio Tecnico di Bacino e l'Agenzia di Protezione civile, esperti dell'Università di Bologna e di Modena - Reggio Emilia.

In considerazione degli elementi esposti e tenuto conto della possibilità di una riattivazione del movimento franoso anche con dinamica rapida e improvvisa (pericolosità elevata), è stato ritenuto necessario avviare, con la massima urgenza, un approfondimento conoscitivo del dissesto e della nuova morfologia dei luoghi e l'allestimento di un monitoraggio strumentale da aggiungere al monitoraggio con radar interferometrico da terra, avviato, quest'ultimo, già dopo alcuni giorni dal crollo.

Il presente contributo è una documentazione dell'attività conoscitiva e dell'impegno profuso per superare la fase di emergenza a seguito del crollo, evidenziando l'approccio multidisciplinare attraverso l'impiego di diverse metodologie investigative in grado, nell'insieme, di fornire un modello dettagliato dell'ammasso roccioso e del suo stato di fratturazione.

Tale approfondimento conoscitivo, assieme all'avvio del monitoraggio, ha consentito di assumere importanti decisioni nella gestione dell'emergenza mediante la definizione di scenari di rischio a tutela della pubblica sicurezza e fornendo, quindi, gli elementi necessari alla formulazione del Piano di emergenza di Protezione Civile.

L'esperienza maturata nell'affrontare il delicato problema dell'emergenza, a seguito del crollo della Rupe di San Leo, ha permesso di sperimentare positivamente un metodo di lavoro per affrontare situazioni complesse come è stato ed è il "caso San Leo", attraverso una perfetta sinergia tra la compagine tecnica e quella istituzionale.

2. Inquadramento geologico – geomorfologico

L'abitato di San Leo e la storica fortezza sorgono su di una rupe situata all'estremità meridionale della Regione Emilia-Romagna, nella valle del fiume Marecchia. La placca rocciosa di San Leo che si eleva ad una quota di 590 m s.l.m., assume una forma rettangolare lunga 600 m, in direzione ovest-est e larga 500 metri, in direzione nord-sud (Fig. 1). Le pareti rocciose ai margini della rupe si presentano subverticali e in alcuni casi aggettanti, con altezze che raggiungono i 100 metri (Fig. 2).

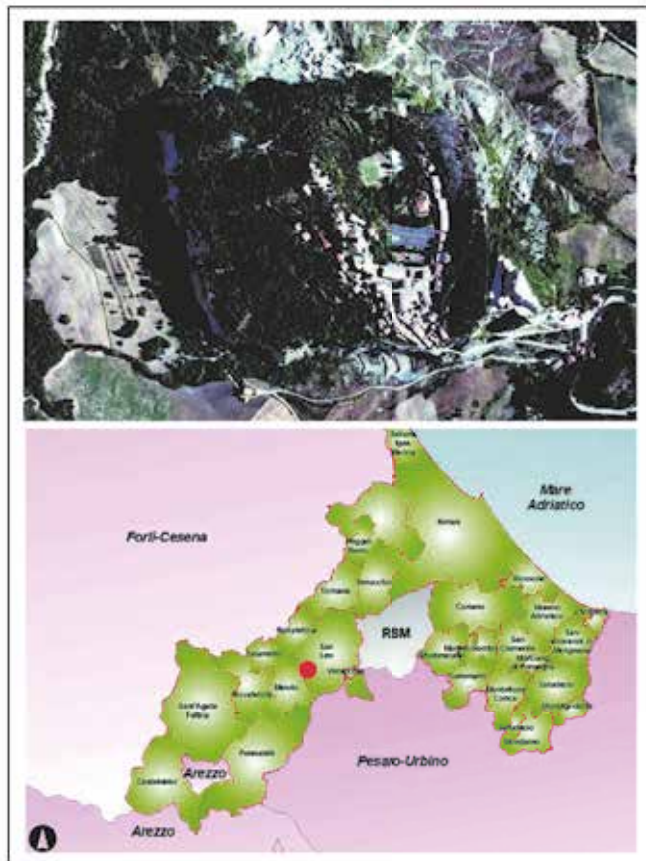


Fig 1 - La placca rocciosa di San Leo che si eleva sulla valle del fiume Marecchia, all'estremità meridionale della Regione Emilia-Romagna.

Le principali unità geologiche, che affiorano in zona, appartengono ai due domini paleogeografici Ligure ed Epiligure, che formano la ben nota "Coltre della Val Marecchia" (Ruggeri, 1958). Si tratta di una coltre tettonica e/o gravitativa, la cui messa in posto è avvenuta durante la formazione della catena appenninica sovrapponendosi, in posizione alloctona, sulla successione umbro-marchigiano romagnola, in posizione autoctona (Ricci Lucchi & Ori, 1985; De Feyter, 1991; Conti, 1994; Roveri et al., 1999; Lucente et al., 2002).

Le unità Liguri sono costituite principalmente da terreni argillosi, marnosi e siltosi e sono intensamente deformati per via della strutturazione tettonica subita durante l'orogenesi appenninica.

Attraverso una discordanza stratigrafica d'importanza regionale (Ricci Lucchi, 1986), le unità Liguri sono coperte da rocce sedimentarie (Epiligure), in prevalenza calcaree e arenacee, la cui deposizione è avvenuta durante la traslazione della Coltre Ligure giungendo, nel corso delle varie fasi di avanzamento, a occupare l'attuale posizione geografica.

La rupe di San Leo è costituita da rocce appartenenti alle unità Epiliguri; si riconoscono due distinte formazioni geologiche: la F.ne di San Marino, prevalentemente calcarea, e la F.ne di Monte Fumaiolo, prevalentemente arenacea (Fig. 3).

La F.ne di San Marino affiora sostanzialmente nella porzione nord-orientale della placca caratterizzando le pareti est e nord della rupe. La F.ne di Monte Fumaiolo occupa, invece, la porzione sud-occidentale della placca, caratterizzando, per gran parte, le pareti ovest e sud della rupe. Nell'insieme l'assetto stratigrafico mostra un'immersione verso sudovest. Il substrato argilloso su cui poggia la rupe appartiene invece alle Argille Varicolori, formazione basale delle unità Liguri in Alta Val Marecchia, intensamente deformata e caotica dalla tipica struttura "scagliosa".

Questa particolare sovrapposizione geologica favorisce un'erosione selettiva che si traduce nella presenza di placche rocciose rigide che "galleggiano" su terreni argillosi, relativamente più teneri ed erodibili. Nel caso

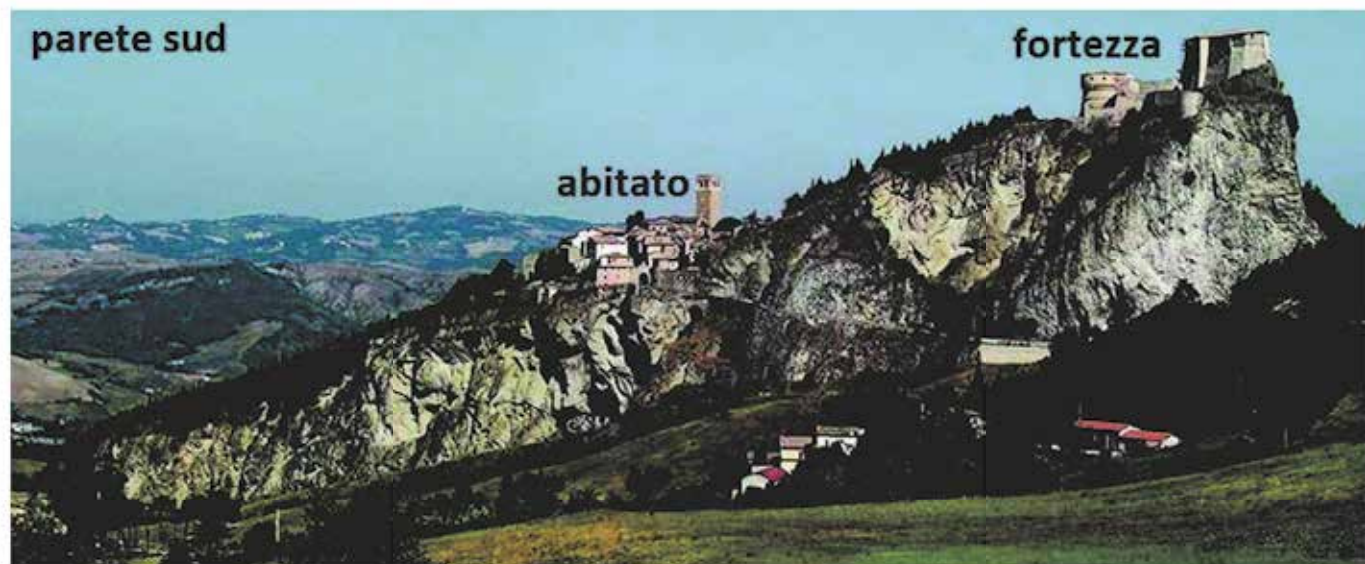


Fig. 2 - La parete sud della rupe di San Leo dove si affacciano, su ripide parti, l'abitato e la storica fortezza.

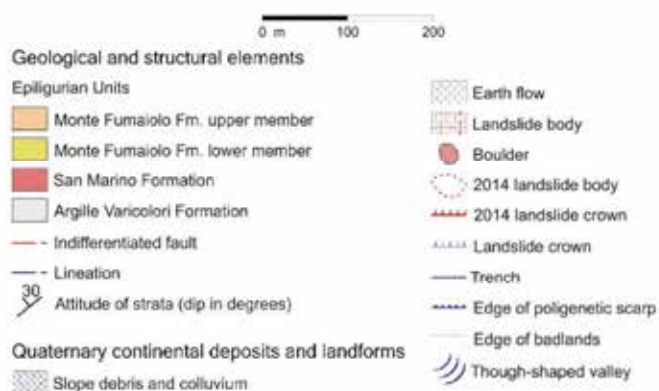


Fig. 3 - Carta geologica - geomorfologica della rupe di San Leo (da Borgatti et al., 2015, modificata da Badioli, 2012).

della rupe di San Leo, il fenomeno erosivo a spese delle argille (Argille Varicolori) è accentuato dall'azione delle acque lungo i due fossi, Seripa e Campone, che, circondando la placca rocciosa, hanno reso più ripidi i versanti.

La sovrapposizione di unità lapidee su terreni argillosi è una delle situazioni geologiche più sfavorevoli per ciò che riguarda la stabilità dei versanti, a causa della diversa risposta dei materiali alle sollecitazioni e alla circolazione dei fluidi che, tendenzialmente, si accumulano al contatto per diversa permeabilità (relativa).

Tutta la rupe è intensamente fratturata presentando più sistemi di fratture che suddividono la placca in blocchi progressivamente ribassati verso i margini quale effetto di processi tettonici e gravitativi (fossili e recenti) subiti nel corso della sua storia geologica. Evidenze di vasti fenomeni franosi si riscontrano in modo esemplare lungo la parete est e la parete nord, lasciando intendere che i fenomeni gravitativi più intensi sono concentrati ai bordi della placca. La cinematica di queste frane non si esaurisce probabilmente nei soli fenomeni localizzati ai margini della placca dovuta all'incipiente fratturazione, ma potrebbe essere ricollegata a deformazioni gravitative profonde (Cancelli & Pellegrini, 1987, Caturani et al., 1991) dovute al carico litostatico gravante sui litotipi argillosi che rispondono a tali sollecitazioni con cedimenti differenziali, lungo le numerose fratture. I cedimenti sono accompagnati da lenti ma costanti rifluimenti delle argille verso le zone esterne meno sollecitate, determinando così rigonfiamenti alla base della rupe (Fig. 4).

I processi di degradazione delle argille sono accompagnati da fenomeni gravitativi per scivolamento, colata e creep che promuovono la sotto-escavazione alla base della rupe e il successivo collasso di ampie porzioni di roccia lungo fratture verticali e sub-parietali che si sviluppano per l'intero spessore dell'ammasso roccioso. Viceversa, crolli minori che non coinvolgono l'intero spessore della rupe avvengono con distacchi di cunei di roccia la cui forma e dimensione è legata all'intersezione dei vari sistemi di fratturazione.

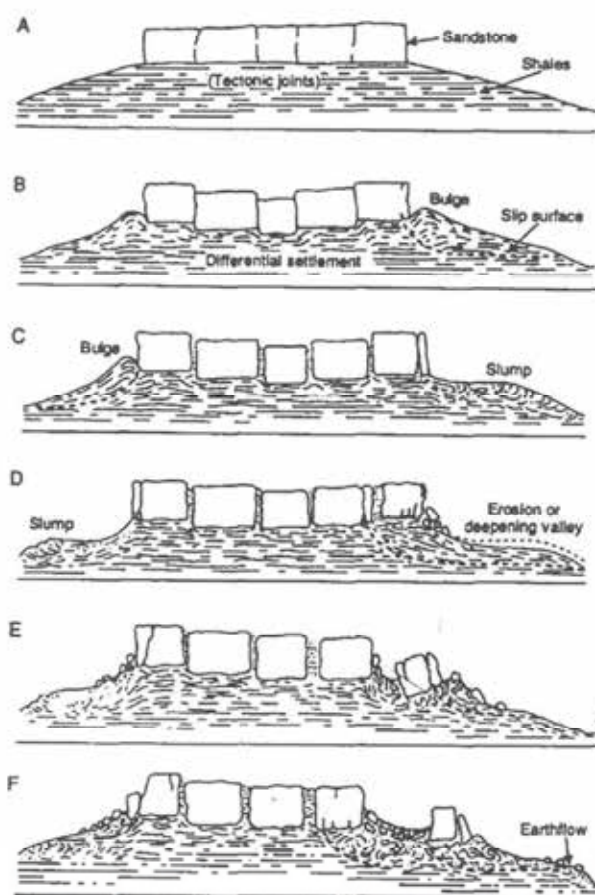


Fig. 4 - Modello evolutivo di deformazione gravitativa profonda che ben si adatta al caso della placca rocciosa rigida di San Leo che galleggia sul substrato argilloso plastico. (Da Cancelli & Pellegrini, 1987).

3. Il crollo del 27 febbraio 2014

Il crollo della rupe di San Leo, del 27 febbraio 2014, è avvenuto per il collasso di un'ampia porzione dell'ammasso roccioso per un fronte largo 160 metri e alto circa 90 metri con un volume complessivo coinvolto di 330.000 mc (Fig. 5).

La dinamica del collasso gravitativo, che si è esaurita nell'arco di pochi minuti, ha avuto origine a seguito del distacco di un'ampia porzione di roccia lungo un piano di frattura preesistente.

Durante il fenomeno testimonianze dirette riferiscono di un accenno al ribaltamento, lasciando presumere che la fratturazione si sia propagata dall'alto verso il basso, sino al contatto con le argille sottostanti, tale da coinvolgere l'intero spessore della placca rocciosa (Figg. 6a, b, c da Borgatti et al., 2015). La marcata colorazione rossastra della parete lasciata a giorno dal crollo è chiaro indice di ossidazione e quindi di manifesta circolazione idrica. Viceversa, le porzioni biancastre visibili in alcune parti del fronte (soprattutto nella parte basale) indicano la presenza di ponti di roccia che hanno ceduto al crollo; il boato che è stato udito dagli abitanti di San Leo la sera prima del crollo è probabilmente imputabile alla rottura/spaccatura delle porzioni di roccia sana (ponte di roccia). A seguito del collasso per ribaltamento (*toppling*) della massa rocciosa (Fig. 6d), il detrito che ne è derivato si è propagato sotto forma di un imponente



Fig. 5 - Foto panoramica da elicottero (vista da nord-est) che mostra la parete del crollo e l'accumulo detritico sottostante in tutto il suo sviluppo in corrispondenza del versante nord della rupe.

e violento crollo (*block and debris avalanche*, Fig. 6e) propagatosi lungo la valle del fosso Campone per un tratto di 400 metri, sollevando una gigantesca nuvola di polvere e proiettando blocchi di roccia per centinaia di metri, disseminati lungo il versante opposto. La coltre di detrito è arrivata a colmare parte della valle del fosso Campone per una superficie di 60.000 mq con blocchi ciclopici di dimensioni anche oltre i 10.000 mc.

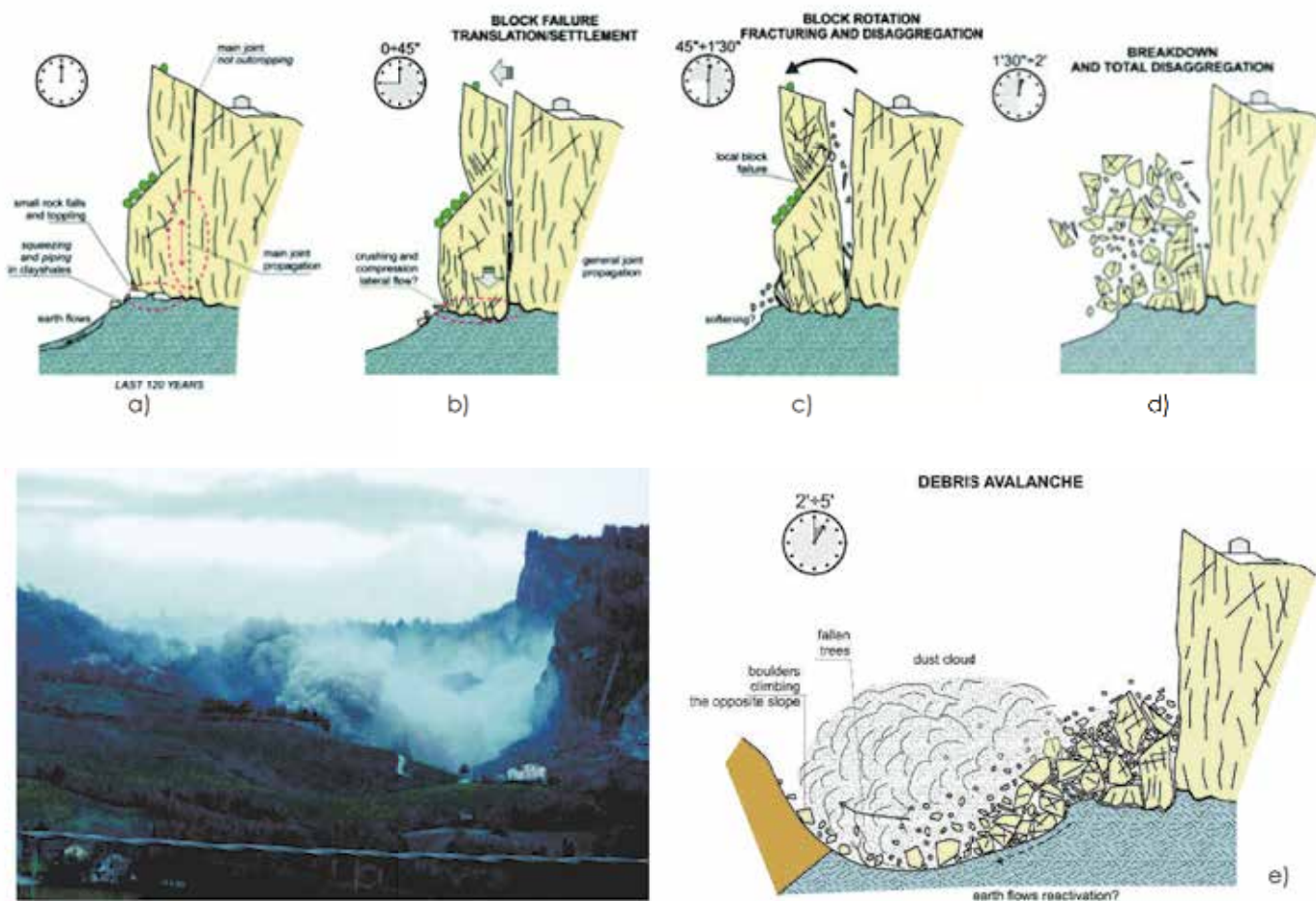


Fig. 6 - Ipotesi sulla dinamica del fenomeno franoso del 27 febbraio 2014: a) propagazione della frattura verso il basso; b) completa rottura e appoggio sulle argille rammollite del substrato; c) ribaltamento; d) crollo e disgregazione della massa rocciosa; e) propagazione del detrito (da Borgatti et al., 2015). Nella foto è immortalato il momento del crollo con il sollevamento di un'immensa nuvola di polvere e frammenti di roccia.



Fig. 7 - La parete nord della rupe di San Leo prima del crollo con alla base la marcata sotto-escavazione e fenomeni gravitativi (colate). La relativa foto di dettaglio fornisce un'idea delle dimensioni del fenomeno (come scala il Geol. M. Gabrielli).

Riprendendo i concetti espressi in precedenza in termini generali sulle cause del dissesto della rupe di San Leo, il crollo del 27 febbraio 2015 è sostanzialmente riconducibile ad alcuni fattori predisponenti, in breve elencati di seguito:

- la sotto-escavazione della placca calcarea a spese del substrato argilloso per rammollimento, degradazione e successivo rifluimento ed espulsione delle argille con il conseguente innescò di fenomeni gravitativi (colate e scivolamenti) (Fig. 7);
- diffusa fratturazione dell'ammasso roccioso con presenza di fratture principali profonde, persistenti e aperte, sede di circolazione idrica (Fig. 6)
- altezza della parete rocciosa con oggetti significativi.

Dopo il crollo del 27 febbraio, non si sono registrati ulteriori movimenti in parete se si escludono, localmente, modesti crolli pellicolari della parte di roccia più alterata a breve distanza dall'episodio parossistico. Si è registrato un crollo modesto anche di recente in una fascia intensamente fratturata e alterata (Fig. 8).

Sin dalle prime ore successive al crollo, il carico della coltre detritica ha generato la destabilizzazione delle argille policrome al piede della coltre stessa con una velocità di movimento di qualche centimetro al giorno. Viceversa, la parte prossimale della coltre detritica a ridosso della parete si è mantenuta sostanzialmente stabile.



Fig. 8 - Il confronto delle due foto, prese all'incirca dallo stesso punto di osservazione, evidenzia il volume di roccia crollato nell'evento "dicembre 2014".

4. Lo studio multidisciplinare

A seguito del crollo dopo le prime verifiche speditive e l'individuazione di un'ampia fascia a rischio, definita in forma cautelativa e in assenza di elementi conoscitivi significativi, è stata avviata un'attività di studio complessa e multidisciplinare necessaria per la comprensione del fenomeno franoso attraverso la determinazione della nuova morfologia dei luoghi, delle dimensioni (volumi di materiale coinvolto, ampiezza del fronte), delle cause e dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. Le informazioni e i dati acquisiti durante la fase di studio (rilievi e indagini) hanno consentito di pianificare e realizzare un sistema di monitoraggio strumentale e di eseguire le verifiche di stabilità dell'ammasso roccioso intorno all'area di crollo.

4.1 Rilievo con Laser scanner terrestre

All'indomani del crollo è stato eseguito un rilievo del fronte del crollo con laser scanner terrestre generando una nuvola di punti opportunamente georeferenziata (nel sistema di riferimento WGS84) rispetto a due distinti punti di osservazione, acquisendo il fronte del crollo con una risoluzione dell'ordine dei 5 cm. In tal modo è stato possibile ricavare con estremo dettaglio la nuova morfologia della parete rocciosa attraverso la modellazione tridimensionale (Fig. 9). Il dato ottenuto dal rilievo laser scanner post-crollo è stato poi messo a confronto con un rilievo eseguito prima

del crollo, nel 2011 (STB Romagna - RER), consentendo di calcolare in maniera piuttosto precisa i volumi di roccia coinvolti nel crollo (Fig. 10).

L'utilizzo del rilievo laser scanner non è stato limitato alla sola valutazione morfologica della parete rocciosa, ma è stata ottenuta anche la giacitura interpolata dei piani di frattura, la cui analisi è stata eseguita con l'ausilio del software COLTOP 3D (Spreafico et al., 2015, in press). Sono state rilevate essenzialmente cinque famiglie di fratture, riconducibili alle medesime rilevate attraverso rilievo geomeccanico tradizionale sia in parete sia sulla sommità della rupe (vedi paragrafo "Rilievo geomeccanico").

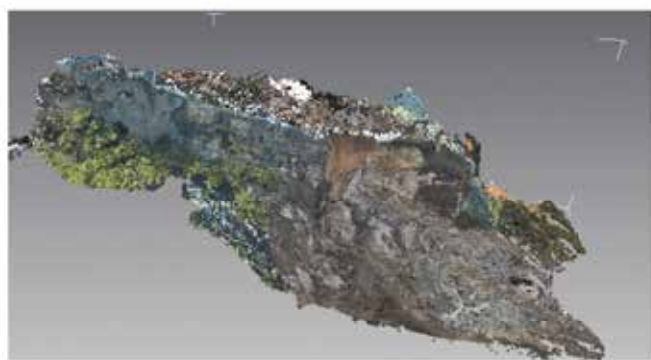


Fig. 9 - Modello tridimensionale da rilievo laser scanner raffigurante la parete nord, sede del crollo, e la parete est della rupe di San Leo (vista da nord-est, confronta con Fig. 5).

SEZIONE V7

SCALA 1:1000

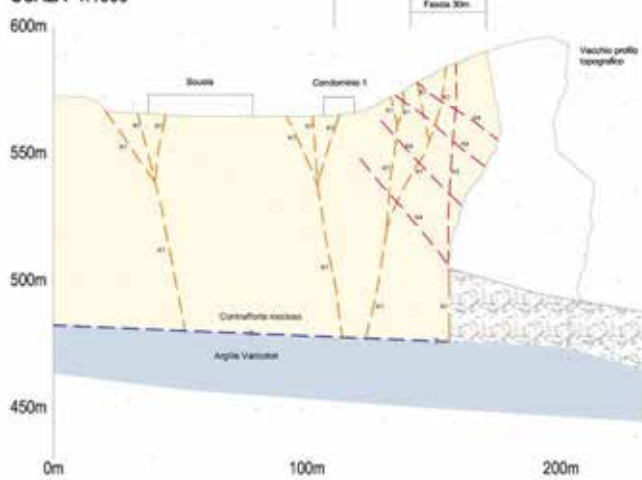


Fig. 10 - Esempio di sezione in cui si può apprezzare la differenza tra il profilo pre-crollo e quello post-crollo ottenuti attraverso l'utilizzo del laser scanner.

4.2 Rilievo con drone e ortofotogrammetria

L'impiego del drone è stato dettato da una duplice necessità: da una parte l'esigenza di verifiche dirette e puntuali sullo stato di stabilità della parete rocciosa per consentire ai geologi rocciatori di effettuare l'ispezione e il rilievo geomeccanico in sicurezza; dall'altra la necessità di avere un prodotto topografico e geometrico tridimensionale ad elevata accuratezza nel minore tempo possibile. L'utilizzo di mezzi a pilotaggio remoto (RPAS), equipaggiati con sensori fotografici ad elevata risoluzione, con sensori di posizionamento e sensori di assetto, assume sempre maggiore rilevanza nello studio dei fenomeni di dissesto idrogeologico sia da un punto di vista

geomorfologico che geotecnico-geomeccanico. I costi contenuti e tempi relativamente brevi si sommano al vantaggio della facilità di "ripetibilità" del dato che permette di confrontare dati e modelli successivi nel tempo con finalità anche di monitoraggio.

Per la verifica del livello di sicurezza della parete sono stati prodotti dei filmati *full HD* che hanno consentito, fra l'altro, di analizzare nel dettaglio le fratture presenti sul fronte del crollo. Le immagini di dettaglio sulle fratture sono state utilizzate per le valutazioni geomeccaniche dello stato fessurativo, integrando le analisi sulla sommità della rupe e le verifiche dirette in parete (vedi paragrafo "Rilievo geomeccanico").

Il rilievo ortofotogrammetrico è stato realizzato su tutta la rupe, comprendendo le aree limitrofe dei fossi Campone e Seripa, per un'estensione complessiva di 84 ha e una quota di volo inferiore ai 70 metri, variabile in funzione della morfologia del terreno. Sono stati eseguiti n. 29 voli fotogrammetrici con camera fotogrammetrica nadirale per la copertura territoriale dell'area e n. 1 volo con camera inclinata per la realizzazione del modello di superficie ad alta densità della parete di crollo, riprendendo l'oggetto di analisi del rilievo con laser scanner terrestre. Per l'acquisizione il drone è stato dotato di: i) fotocamera reflex a focale fissa calibrata ad alta risoluzione, ii) di sistema satellitare per determinare le traiettorie di volo e i cosiddetti valori approssimati dei centri di presa fotogrammetrici e iii) di un sistema inerziale triassiale per controllare l'assetto di volo.

Attraverso le varie fasi di processamento fotogrammetrico si è ottenuto come prodotto di partenza una nuvola di punti densa (DSM - Digital Surface Model) dalla quale poi si è ricavato il modello numerico digitale del terreno (DTM - Digital Terrain Model) ad alta risoluzione con accuratezza planimetrica 0,03-0,10 m e accuratezza altimetrica 0,08 - 0,15 m (Fig. 11).



Fig. 11 - Modello tridimensionale da rilievo con drone di tutta la rupe di San Leo (vista da nord-est).

4.3 Rilievo geomeccanico

Il rilievo geomeccanico eseguito per la determinazione delle principali famiglie di fratture che caratterizzano l'ammasso roccioso, si è articolato in due distinti approcci: uno, rivolto alle fratture visibili sulla sommità dell'ammasso roccioso, l'altro, eseguito in parete con tecnica alpinistica.

Il rilevamento geomeccanico dello stato di fratturazione sulla sommità ha riguardato la porzione nord orientale della rupe di San Leo, in un'area individuata attorno alla parete di crollo, in relazione al primo scenario di rischio emerso subito dopo il crollo.

Il rilievo si è articolato in due distinte campagne di rile-

vamento attraverso la raccolta dei seguenti dati:

- direzione di immersione delle discontinuità con bussola da geologo;
- inclinazione delle discontinuità, con bussola da geologo;
- tracciamento della frattura con GPS;
- rimbalzo del martello di Schmidt;
- profilo delle discontinuità con pettine di Barton.

Il rilievo geomeccanico in sommità ha messo alla luce la presenza di quattro famiglie di discontinuità principali identificate con sigla convenzionale K1, K2, K3 e K4 con l'aggiunta della stratificazione denominata Ks (sono state identificati altre due famiglie minori K0 e K5) (Figg. 12, 13, 14).



Fig. 12 - Traccia delle principali fratture sulla sommità della rupe (famiglie K1, K2, K3 e K4).



Fig. 13 - Alcune immagini della frattura K3.2. La frattura lungo cui è avvenuto il distacco appartiene alla stessa famiglia di fratture.



Fig. 14 - Vistose cavità lungo l'allineamento di fratture appartenenti alla famiglia K2 laddove c'è l'intersezione con la famiglia K1 (confronta con Fig. 12).

In breve, la famiglia K1 individua le strutture tettoniche per faglia diretta con alto angolo di inclinazione. La famiglia K2 individua le fratture associate al sistema di faglie principale di San Leo, sempre ad alto angolo di inclinazione. La famiglia K3 individua fratture disposte a circa 70° rispetto alla famiglia K1 e sempre ad alto angolo di inclinazione. Tale famiglia, che ha generato la nicchia di crollo attuale, mostra due fratture ben distinte, denominate K3.1 e K3.2, aperte anche diversi centimetri e probabilmente parecchio in profondità, analogamente alla frattura che ha generato la nicchia di crollo dell'evento del febbraio 2014. La famiglia K4 è circa parallela alla famiglia K1, ma mostra un'inclinazione variabile tra i 30 e i 60 gradi. Sono stati raccolti complessivamente 86 dati di giacitura delle diverse discontinuità. Tali dati sono stati elaborati con un apposito software denominato DIPS (Rocscience, Toronto), fornendo classici stereogrammi dei poli e dei piani nel reticolo di Wulff (Fig. 15).

Il rilievo in parete è stato eseguito con tecnica alpinistica (calate in corda); sono state effettuate 7 calate, 4 delle quali lungo la parete est, compresa tra la Rocca ed il ciglio di crollo e 3 lungo la parete di crollo (Fig. 16). I rilievi eseguiti hanno avuto il duplice scopo di osservare da vicino i grandi sistemi di fratture individuate da ispezione visiva frontale con uso di binocolo e drone e di seguire i grandi sistemi di giunti rilevati sulla sommità. Le ispezioni in parete non hanno la pretesa di un'indagine a tappeto delle discontinuità, bensì mirano all'osservazione delle caratteristiche peculiari dei giunti, quali apertura, condizioni di riempimento, possibili indizi di movimenti recenti,

umidità ed eventuali circolazioni idriche. Inoltre, è bene precisare che le indagini sono state indirizzate soprattutto ad ispezionare le fratture maggiormente pervasive, che potenzialmente possono originare crolli di una certa entità, mentre si è dato minor peso ai dissesti localizzati e/o corticali, meno importanti nella fase di emergenza. Nelle Figg. 17 e 18 sono rappresentate, rispettivamente per la parete nord e per la parete est, le principali fratture rilevate attraverso le calate dei geologi rocciatori. Il mutuo incrocio delle fratture principali (*master joints*) ottenute nel corso delle singole calate ha permesso di identificare in via schematica i blocchi principali in cui può essere suddivisa la parete rocciosa e l'area più prossima in sommità, ai fini delle verifiche di stabilità.

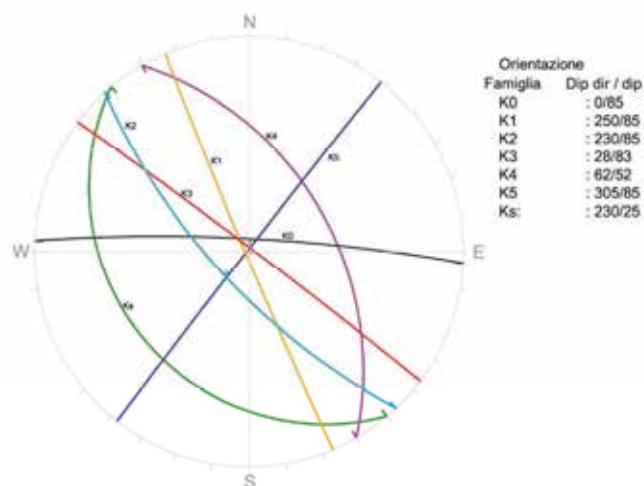


Fig. 15 - Ciclografiche delle famiglie delle fratture individuate e loro giacitura media.



Fig. 16 - Calata del geologo rocciatore lungo la parete del crollo. Si noti la colorazione rossastra della superficie per via dell'ossidazione a seguito delle infiltrazioni d'acqua prima del crollo.



Fig. 17 - Principali fratture rilevate lungo la parete del crollo (parete nord).

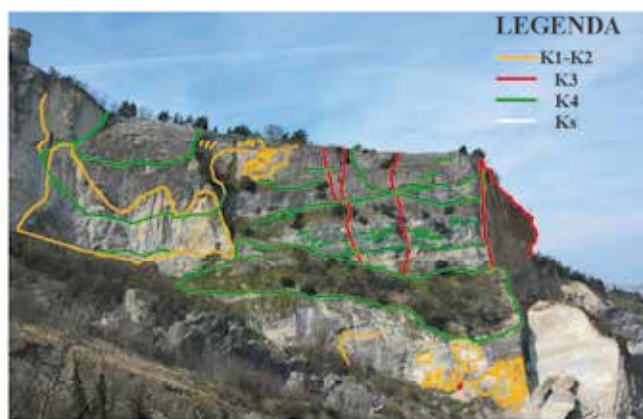


Fig. 18 - Principali fratture rilevate lungo la parete est.

4. 4. Sondaggio profondo

Lungo la strada di accesso alla fortezza, nella zona del tornante, risultata dopo i primi rilievi piuttosto delicata in termini di sicurezza, è stato eseguito un sondaggio profondo per una verifica diretta delle fratture dell'ammasso roccioso ad integrazione del rilievo di terreno (sulla sommità della rupe e in parete) (Fig. 19). L'indagine è stata completata con un rilievo video e acustico all'interno del foro.



Fig. 19 - Ubicazione del sondaggio profondo nella zona del tornante lungo la via di accesso alla fortezza.

Il sondaggio, ubicato all'incirca sulla linea di mezzzeria della strada, è stato spinto fino alla profondità di 111.0 m dal piano campagna attraversando essenzialmente rocce calcaree e calcarenitiche stratificate, con immersione verso ovest - sudovest ed inclinazione di circa 25°, appartenenti alla formazione di San Marino. Lungo tutto

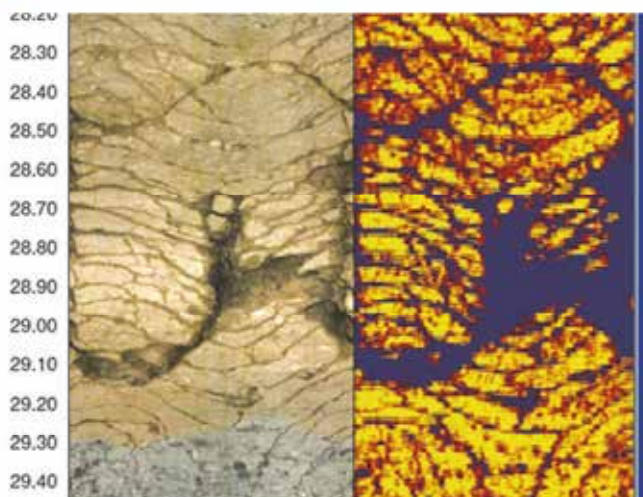


Fig. 20 - La carota e l'ispezione in foro (video e acustica) hanno evidenziato la presenza di importanti fratture presenti in profondità, non visibili in superficie.

il sondaggio sono stati rilevati orizzonti conglomeratici e, localmente, sottili livelli di argilla e sabbia.

Nel corso della perforazione sono state intercettate una serie di fratture alcune delle quali piuttosto significative riferibili alla famiglia K4 (facilmente riconoscibili per assetto contrario alla stratificazione): si tratta di fratture aperte anche se con lembi scabri e incastrati, generalmente sono accompagnate da una fascia di ossidazione (Fig. 20). Alla profondità di 84,80 m è stata individuata una faglia (frattura con evidenze di movimento reciproco fra i lembi), facilmente riconoscibile per le strutture presenti sulla superficie dei due lembi: il lembo superiore presenta ciottoli levigati mentre il lembo inferiore risulta striato (Fig. 21). Dall'orientamento della frattura sembra che tale faglia si sia sviluppata lungo una preesistente superficie di strato. Dalla carota non è possibile determinare la vergenza dello spostamento né tantomeno stabilire se trattasi di una faglia diretta o inversa. Il confronto tra la sezione geomeccanica ottenuta utilizzando i dati del rilievo di terreno e l'aggiornamento eseguito dopo le risultanze della prova in situ (Fig. 22) testimonia l'importanza del sondaggio profondo nella determinazione dello stato fessurativo dell'ammasso roccioso. Molte delle fratture presenti sono probabilmente mascherate in superficie a causa della vegetazione e dei manufatti antropici (es. strada).

5. Monitoraggio

Sin dalle prime ore del crollo si è ritenuto urgente avviare il



Fig. 21 - L'immagine mostra i due lembi della faglia con tipiche levigature e striature.

monitoraggio nella zona della frana per la gestione della fase di emergenza e la raccolta dei primi dati sul comportamento del fronte del crollo. A tal fine è stato installato, a pochi giorni dalla frana (7 marzo 2015, Università di Firenze), il radar interferometrico da terra in grado di rilevare in tempo reale le deformazioni della parete di crollo. Successivamente, al radar interferometrico da terra è stato aggiunto un sistema di monitoraggio strumentale attraverso l'applicazione di sensori (estensimetri) direttamente sulle fratture in superficie (monitoraggio di fase 1) e sulle fratture in profondità (monitoraggio di fase 2).

5.1 Monitoraggio di fase 1.

Con i rilievi delle fratture in sommità è stata avviata anche l'installazione del sistema di monitoraggio di fase 1 volto al controllo delle fratture in superficie. La messa in opera dell'impianto è stata completata il 18 aprile 2014, giorno dell'avvio del monitoraggio di fase 1. In Fig. 23 è rappresentata l'ubicazione della strumentazione che consiste in: 13 estensimetri a filo (ES1-13, esempio in Fig. 24), 4 estensimetri a potenziometro (o a barra, EP1-4, esempio in Fig. 25), 2 vibrometri (misura le vibrazioni nel terreno) e 5 centraline di acquisizione dati (3 per gli strumenti estensimetrici, esempio in Fig. 26, e 2 per i vibrometri). Tutta la strumentazione è stata, opportunamente, dotata di struttura protettiva per limitare danni accidentali che possono derivare dal maltempo e da animali.

Come già per il sondaggio profondo realizzato per acquisire ulteriori informazioni, nella zona del tornate (Fig. 27) è stata valutata anche la necessità di procedere con il monitoraggio delle fratture in profondità, ad integrazione del monitoraggio di superficie e quale anticipazione del monitoraggio di fase 2 (vedi paragrafo successivo), attraverso l'impiego di estensimetri in foro (estensimetri multibase, Fig. 28). Pertanto, sono stati eseguiti due sondaggi a carteggio continuo, B01 e B02, profondi rispettivamente 32 m e 15 m e con inclinazione compresa tra 5° - 10° rispetto al piano orizzontale. Nel foro B01 sono stati installati 3 sensori: uno a fondo foro, a 32 m) e gli altri due a tergo delle principali fratture (22,80 m e 11,60 m). Nel foro B02, più corto, sono stati inseriti due sensori: uno, sempre a fondo foro, a 14,50 m, e l'altro a tergo di una frattura significativa, a 7,80 m. Gli estensimetri in foro sono operativi all'interno del

SEZIONE V17

SCALA 1:1000

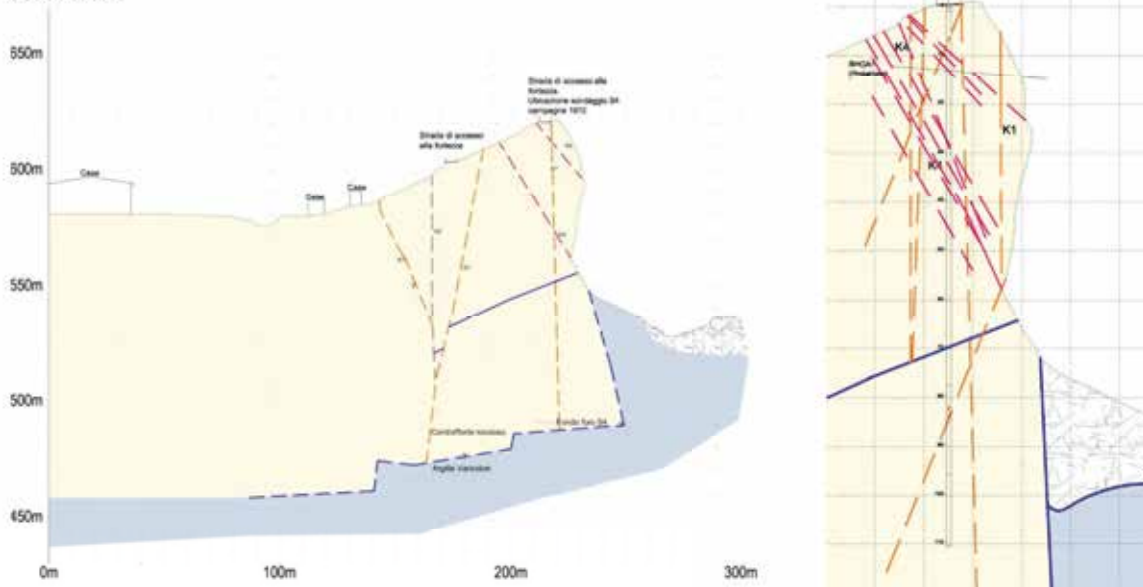


Fig. 22 - A sinistra la sezione (uno spaccato dell'ammasso roccioso) dopo i rilievi di terreno ma prima dell'esecuzione del sondaggio; a destra, dopo il sondaggio.

sistema di monitoraggio di fase 1 dall'8 luglio 2014. Le perforazioni, oltre a servire per l'installazione degli estensimetri multibase, hanno fornito importanti indicazioni sullo stato fessurativo della zona del tornante sia attraverso l'analisi delle carote che attraverso la video-ispezione, analogamente al sondaggio verticale profondo (vedi Fig. 29).

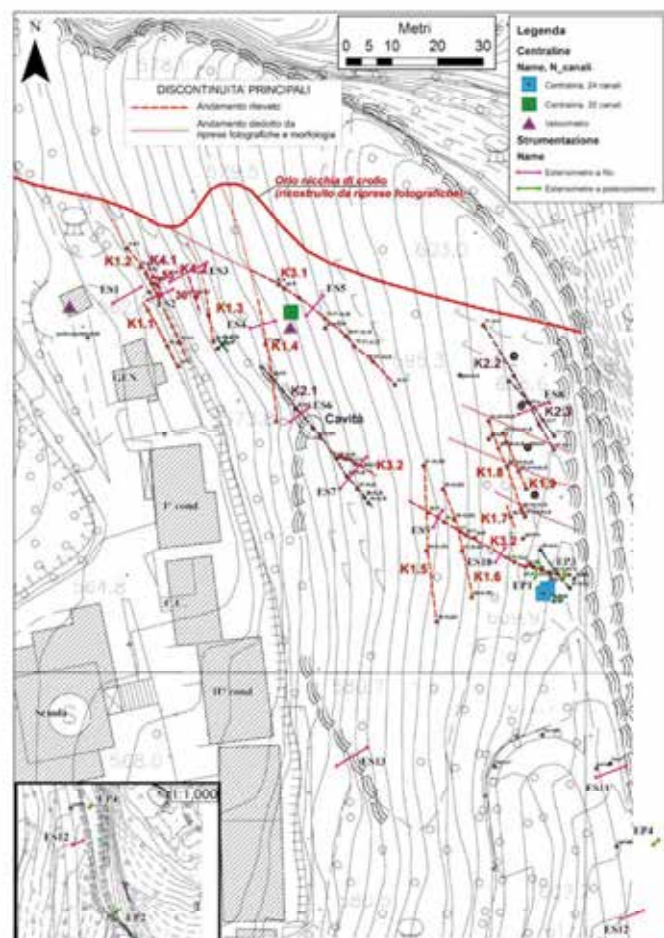


Fig. 23 - Planimetria della zona del crollo con ubicazione della strumentazione del monitoraggio di fase 1.



Fig. 24 - Estensimetro a filo. L'estensimetro a filo misura l'apertura della frattura attraverso un filo in acciaio in tensione. L'affidabilità è discreta, relativamente ingombrante come strumento necessita, per la presenza di fili, di un'adeguata protezione



Fig. 25 - Estensimetro a barra. L'estensimetro a barra misura l'apertura della frattura con una precisione minore o uguale a 0,5 mm. È più affidabile e preciso dell'estensimetro a filo.



Fig. 26 - Centraline di acquisizione dati con relativi pannelli solari per l'alimentazione. Le centraline (non visibili) sono state opportunamente dotate di struttura protettiva.



Fig. 27 - Traccia dei sondaggi sub-orizzontali attrezzati con estensimetri multibase in foro nella zona del tornante della strada di accesso alla fortezza.



Fig. 28 - Testa di estensimetro multibase (a sinistra) e relativi trasduttori o potenziometri. Gli estensimetri in foro possono essere costituiti da una (estensimetro monobase) o più basi di misura (estensimetro multibase) ancorate mediante cementazione a quote prestabilite all'interno di una perforazione. I punti di ancoraggio sono collegati alla superficie con aste in acciaio opportunamente protette da guaine anti-attrito che favoriscono lo scorrimento. Il movimento delle aste rispetto alla testa di riferimento installata in superficie permette di determinare i movimenti dell'ammasso o della struttura monitorata attraverso la misura del loro spostamento.

Il funzionamento del sistema di monitoraggio avviene in automatico ovvero la raccolta e la trasmissione del dato avvengono senza la necessità di intervento da parte di un operatore. Lo schema di Fig. 30 illustra la struttura e il funzionamento del sistema di monitoraggio in essere:

1. Gli estensimetri installati consentono di misurare le variazioni di distanza fra i due lembi della frattura (apertura della frattura).
2. Sono collegati, a gruppi e mediante cavi, alle centraline di acquisizione alimentate con pannello solare.
3. Le centraline di acquisizione (unità periferiche) raccolgono i dati dai sensori collegati ogni 30 minuti (impostazione variabile) e li trasmettono, via GPRS, a postazione remota (server gestionale - centro acquisizione).
4. Attraverso una piattaforma WEB dedicata è possibile visualizzare, scaricare e gestire i dati in tempo reale.

Il monitoraggio è stato concepito con una duplice finalità.

1. Funzione di studio e conoscenza del comportamento dell'ammasso roccioso al fine di fornire indicazioni circa la possibile evoluzione dello scenario di rischio ed essere di supporto per eventuali interventi di mitigazione del rischio e di consolidamento.
2. Funzione di allerta/allarme a supporto del Piano di emergenza di protezione civile - in caso di superamento delle soglie il sistema di monitoraggio invia messaggio di allarme alla rubrica della rete di allarme.

Allo stato attuale la strumentazione che concorre all'attivazione del Piano di emergenza è la seguente:

- estensimetri a filo ES11 e ES12 - estensimetri a barra EP1, EP2, EP3 ed EP4 - estensimetri multibase in nei fori B01 e B02, relativamente alla zona del tornante (zona B2, vedi paragrafo "Scenari di rischio", vedi planimetria di Fig. 23);
- estensimetri a filo ES1, ES2, ES3, ES4, ES6, ES7, ES9, ES10 - estensimetri a barra EP1 ed EP3, relativamente alla zona che comprende la scuola, il condominio 2 e la caserma dei carabinieri (zona C, vedi paragrafo "Scenari di rischio", vedi planimetria di Fig. 23).

Al momento sono esclusi dal sistema di attivazione del sistema automatico del Piano di emergenza alcuni estensimetri a filo (ES5, ES8 ed ES13) e i due vibrometri.

Considerata la tipologia del potenziale dissesto (frana di crollo) si ritiene che, a seguito di superamento dei valori di soglia, il primo provvedimento urgente da adottare sia l'immediata evacuazione delle aree potenzialmente interessate. La scelta delle soglie rappresenta uno degli elementi più critici rispetto ai processi di installazione e gestione del monitoraggio, perché a priori non è possibile definire delle soglie ma occorre un congruo periodo di osservazione del dato di monitoraggio, con la consapevolezza che vi possa essere la necessità di dover aggiornare le stesse periodicamente, che è necessario bilanciare l'affidabilità delle soglie per assicurare segnalazioni tempestive evitando nel contempo l'accadimento di falsi allarmi. Nelle frane di crollo che interessano ammassi rocciosi fratturati, come nel caso specifico qui trattato, l'individuazione di soglie è estremamente difficile considerando che solitamente presentano tempi di preannuncio estremamente brevi, essendo, fra l'altro, difficilmente correlabili

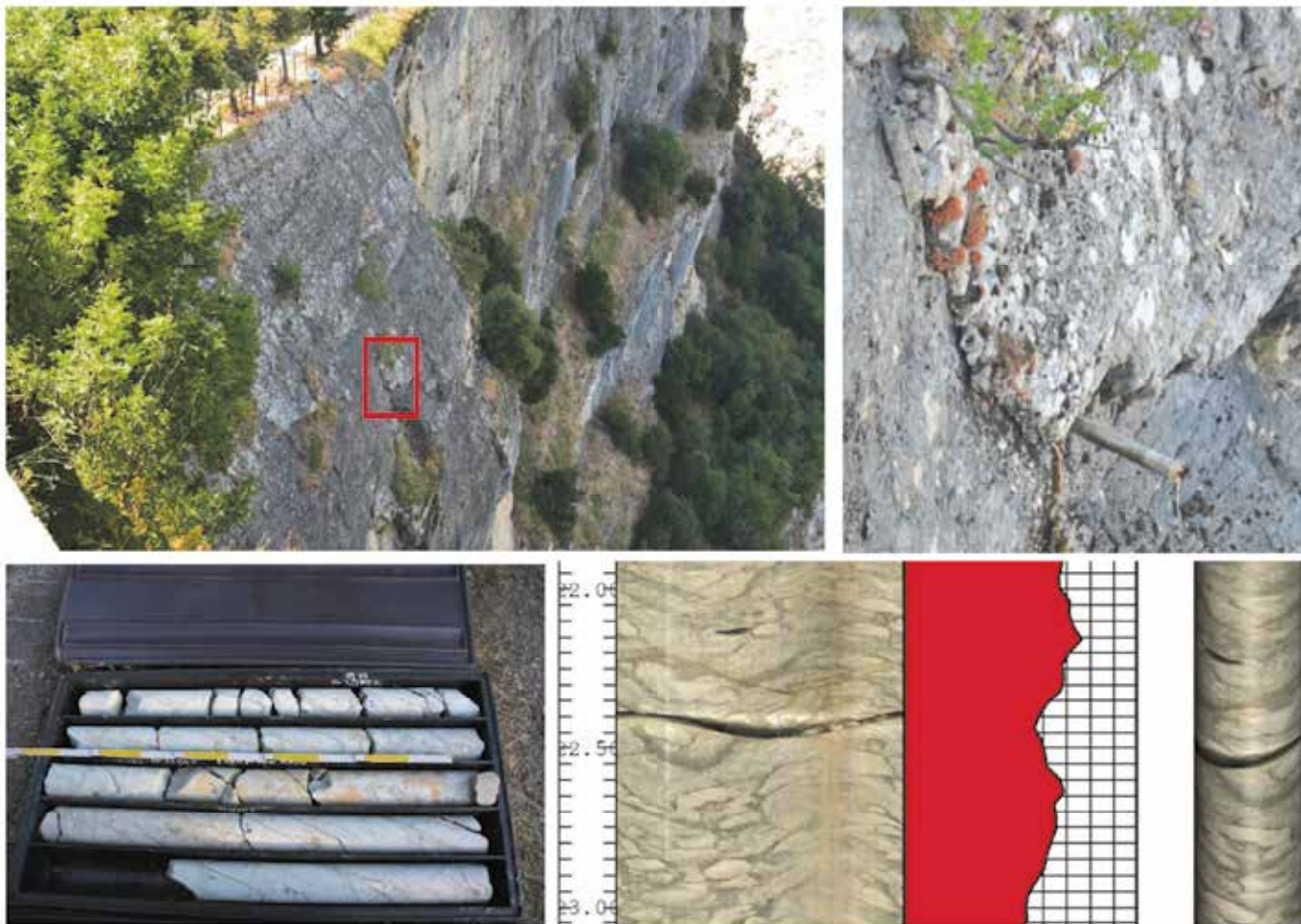


Fig. 29 - Sondaggio sub-orizzontale B01 eseguito in corrispondenza del tornante della strada di accesso alla fortezza. La perforazione è stata spinta fino alla venuta a giorno in parete della testa del carotiere. Il carotaggio ha messo in luce la presenza di importanti fratture visibili in carota e nell'elaborato della video-ispezione.

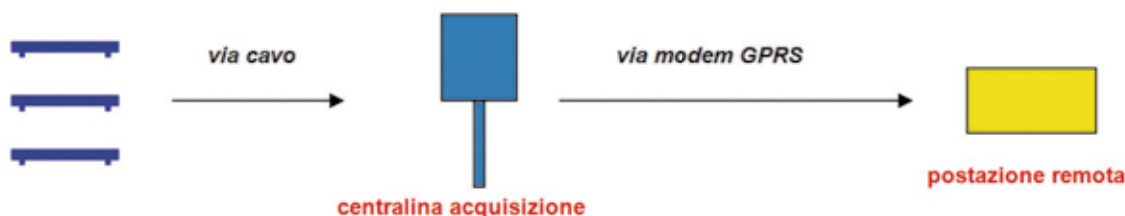


Fig. 30 - Schema di funzionamento del sistema di monitoraggio.

con cause scatenanti come ad es. gli eventi di pioggia. Le soglie stabilite nel monitoraggio della rupe di San Leo sono ancora in una fase di taratura e pertanto potranno essere oggetto di modifiche in relazione ai dati che verranno acquisiti nel corso delle misure, anche in relazione agli andamenti stagionali di lungo periodo non ancora registrati (il sistema di monitoraggio di fase 1 è operativo dal 18 aprile).

Dal 30 settembre 2014 sono attive soglie differenziali per superamento del valore rispetto alla media delle 24 ore precedenti, il cui valore cambia a seconda del tipo di strumento considerato:

- estensimetri a filo $\pm 2,5$ mm;
- estensimetri a barra $\pm 1,0$ mm;
- estensimetri in foro $\pm 0,5$ mm.

La deriva termica giornaliera, ovverossia il fenomeno che introduce un errore, più o meno grande, nella misura di un

segnale nei dispositivi elettronici al variare della temperatura, cambia in funzione della tipologia di strumento. Ad oggi non è possibile valutare la deriva termica stagionale in virtù della limitata quantità di dati registrata. Occorre avere almeno un anno di dati disponibili per avere una prima indicazione in merito. Le variazioni in apertura/chiusura registrate per effetto della deriva termica non sono associabili a un effettivo fenomeno fisico di apertura/chiusura della lesione e comunque le oscillazioni dei valori giornalieri sinora registrati si mantengono ben al di sotto dei valori di soglia definiti (Figg. 31 e 32). Si sono manifestati due episodi di superamento di soglia con allarme ma si è trattato di problemi tecnici e non di movimenti lungo le fratture. Sistemi di monitoraggio così complessi costituiti da sensori e dispositivi elettrici ed elettronici possono essere soggetti a inconvenienti tecnici legati a fulminazioni, a carichi di tensione, a interruzione del segnale per comunicazioni via GPRS, a danni provocati da animali.

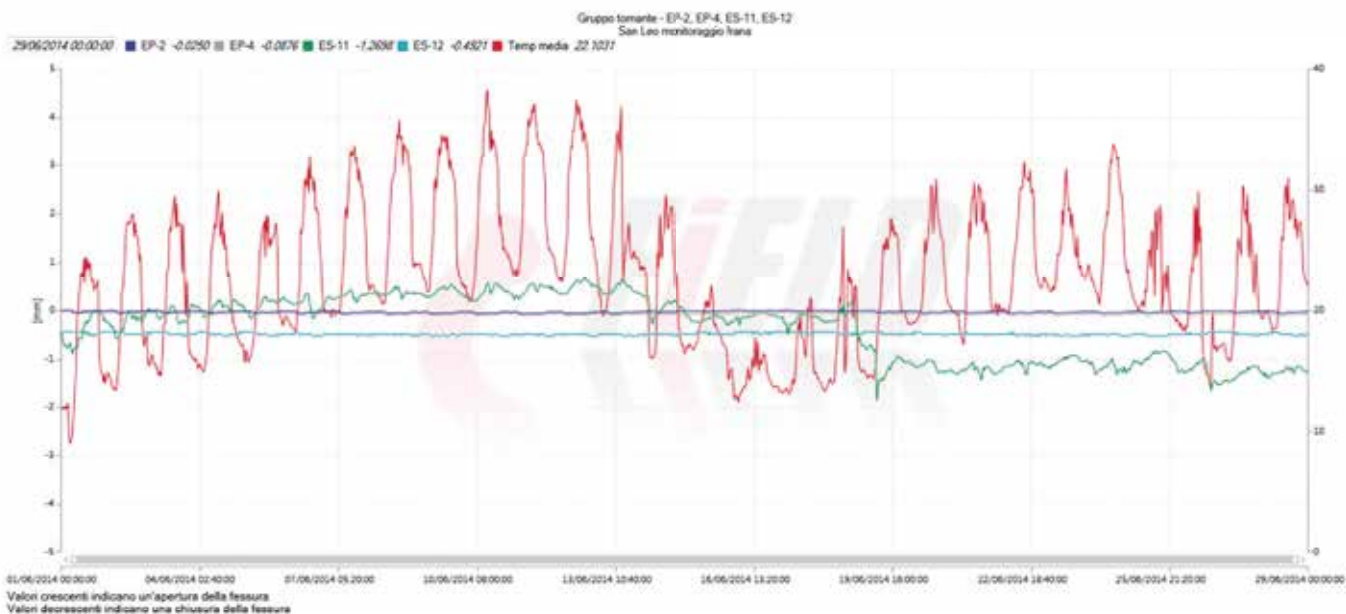


Fig. 31 - Andamento dei valori degli strumenti a presidio delle tornante della strada di accesso alla fortezza. I dati si riferiscono al mese di giugno 2014.

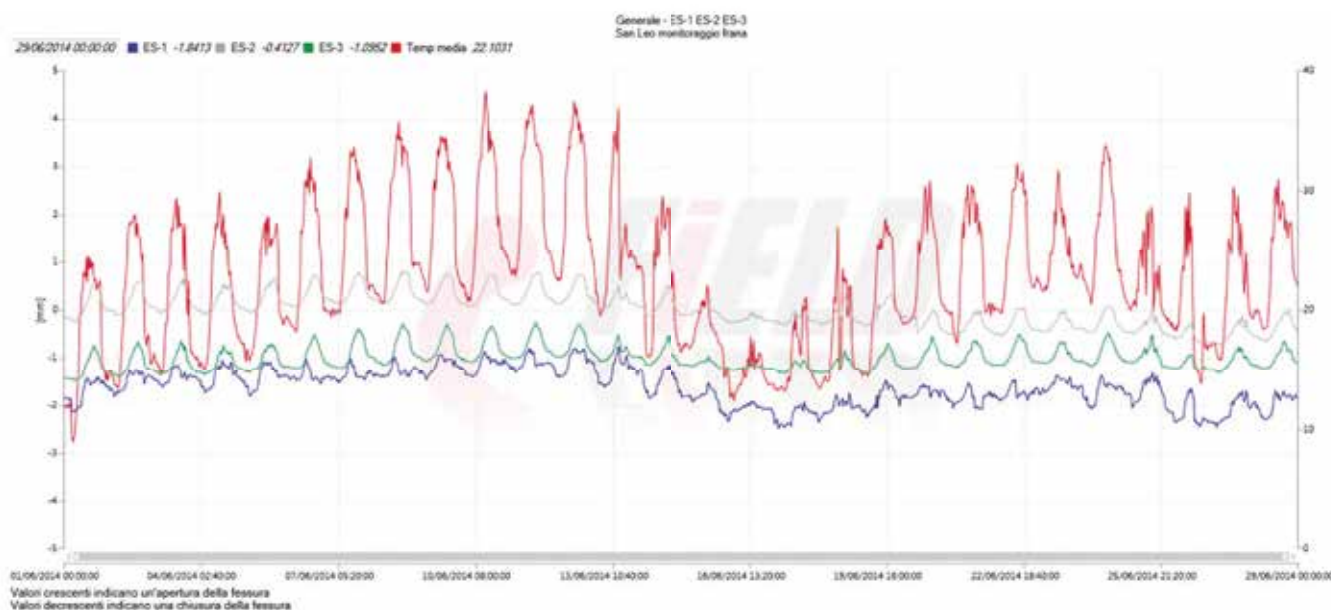


Fig. 32 - Andamento dei valori degli strumenti a presidio delle abitazioni private, Scuola e Caserma dei Carabinieri. I dati si riferiscono al mese di giugno 2014.

5.2 Monitoraggio di fase 2

Il monitoraggio di fase 2, come già sottolineato, nasce con lo scopo di controllare i movimenti lungo le fratture in profondità, mediante la posa di estensimetri multibase in foro. L'area d'installazione si sviluppa attorno al ciglio del crollo (coronamento della frana) con le perforazioni orientate dall'interno verso l'esterno con lo scopo di intercettare le principali fratture individuate in superficie (Fig. 33).

Sono stati eseguiti 6 sondaggi a carotaggio continuo con profondità variabile tra 20 m e 71 m e con inclinazione rispetto al piano orizzontale variabile tra 5° e 30°. Ciascun foro è stato attrezzato con n. 3 sensori (basi estensimetriche): a fondo foro e in corrispondenza delle fratture più significative come da tabella (Tab. 1). L'installazione è stata terminata il 24 febbraio 2015 e il sistema ha già iniziato a registrare i dati derivanti dai

sensori. Tuttavia sarà necessario un breve periodo di funzionamento per la validazione dei dati e l'inserimento di tale strumentazione nell'impianto di allarme per un sistema di monitoraggio integrato (fase 1 + fase 2) che dovrà garantire il controllo della stabilità dell'ammasso roccioso nella zona del crollo almeno per i prossimi 5 anni, prevedendo un'attività di manutenzione ordinaria (preventiva) e straordinaria (correttiva) per una gestione efficiente, affidabile e duratura nel tempo. La manutenzione è difatti estremamente strategica nell'ambito della gestione, a lungo termine, di un sistema di monitoraggio in automatico affinché se ne possa garantire il funzionamento dinanzi ad un'ampia gamma di inconvenienti che possono manifestarsi, dal degrado dei vari componenti ai danni per fenomeni naturali e accidentali, senza tralasciare l'evenienza di atti di vandalismo. Anche in questo caso, le perforazioni, oltre a servire per l'installazione degli estensimetri multibase, hanno forn-

to importanti indicazioni sullo stato fessurativo dell'ammasso roccioso nella fascia attorno al coronamento della frana, sia attraverso l'analisi delle carote che attraverso la video-ispezione (Fig. 34). In ciascun foro sono state identificate diverse fratture importanti non rilevate ovviamente attraverso il rilievo di campagna; in alcuni casi si tratta di fratture aperte con marcata ossidazione quale indice di circolazione idrica in profondità. Sono in corso le valutazioni geomeccaniche sui nuovi dati ottenuti attraverso i carotaggi.



Fig. 33 - Traccia dei fori attrezzati con gli estensimetri multibase per il monitoraggio delle fratture profonde.

6. Analisi di stabilità

I dati geomeccanici ricavati dai rilievi di terreno e dal sondaggio sono stati utilizzati per le verifiche di stabilità, quale ulteriore elemento decisionale nell'ambito della valutazione e definizione degli scenari di rischio. Qui di seguito sono commentati i risultati delle verifiche di stabilità in forma sintetica.

- Analisi di stabilità globale della parete del crollo (parete nord).

Le analisi di stabilità globale della parete nord sono state condotte con metodi agli elementi finiti (FEM) e agli elementi distinti (DEM, Fig. 35). Le metodologie di verifica mettono in luce che il fenomeno predisponente all'innescò d'instabilità globale della porzione di placca frontale (crolli generalizzati) è dovuto alla sotto-escavazione della placca rocciosa. Tale fenomeno, che risulta determinante nell'instaurarsi di crolli di grandi dimensioni, appare ora sospeso poiché le argille alla base sono coperte dal detrito generatosi durante l'evento del 27 febbraio 2014. Nel lungo periodo potrebbero ripresentarsi le condizioni sfavorevoli alla stabilità nel momento in cui si riattiveranno i processi erosivi alla base con asportazione del detrito per opera di scivolamenti e colate della parete rocciosa.

- Analisi di stabilità locale della parete del crollo (parete nord).

Le analisi di stabilità locale della parete nord sono state condotte con metodi all'equilibrio limite.

L'analisi si è concentrata nella porzione centrale del crollo, ove è presente una zona molto fratturata dell'ammasso per via di fratture K1 e K4 (Fig. 36). Le analisi di stabilità dei cunei rocciosi sono staticamente soddisfatte sebbene permangono fattori di incertezza tali per rite-

SONDAGGIO	PROFONDITÀ	BASE 1	BASE 2	BASE 3	DATA
B01	32.50	32.00	22.80	11.60	luglio 2014
B02	14.80	14.50	7.80	=====	luglio 2014
B03	25.10	24.50	15.95	8.70	feb 2015
B04	20.70	19.90	13.50	7.50	feb 2015
B05	28.20	27.75	23.40	15.00	feb 2015
B06	46.60	44.60	29.20	13.70	feb 2015
B07	71.00	70.50	52.10	10.70	feb 2015
B08	67.20	66.50	54.20	19.00	feb 2015

Tab. 1. Lunghezza dei sondaggi sub-orizzontali e profondità di posa dei sensori estensimetrici.

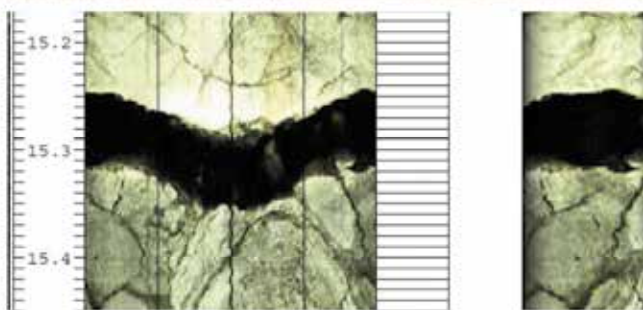


Fig. 34 - Un esempio di frattura significativa individuata nel corso dei carotaggi eseguiti per la posa degli estensimetri multibase in foro. In questo caso si tratta di una frattura aperta di circa 7,5 cm, ben riconoscibile anche in carota.

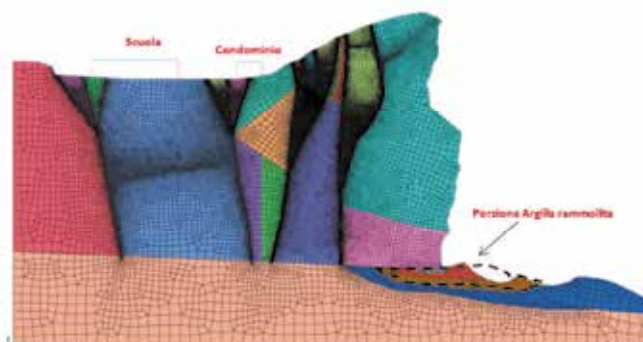


Fig. 35 - Verifiche di stabilità globale sulla parete di crollo. Il modello DEM evidenzia l'importanza della sotto-escavazione delle argille del substrato quale causa di predisposizione al dissesto (la sezione geomeccanica di riferimento è mostrata in Fig. 10).

nere il ciglio non sicuro. Per quanto riguarda la stabilità dell'area evidenziata in giallo, essa appare in condizioni di stabilità precaria per il possibile scivolamento di blocchi di roccia lungo le discontinuità della famiglia K4.

- Analisi di stabilità globale della parete est.

Le analisi di stabilità globale della parete est sono state condotte con metodi agli elementi distinti.

Come avviene per la parete nord, lungo la parete est la stabilità globale è assicurata dalla presenza di una coltre di detrito roccioso, generatosi probabilmente durante un crollo avvenuto nel 1700, che ha sospeso consistentemente il fenomeno di sotto-escavazione della placca rocciosa.

I modelli hanno mostrato che, nel caso in cui questi processi dovessero riattivarsi, in questa porzione della rupe potrebbero accadere fenomeni di perdita di resistenza lungo le discontinuità e successivi movimenti senza raggiungere il collasso della rupe nell'immediato. In questo caso, l'ammasso roccioso sembra riuscire ad assestarsi raggiungendo un nuovo equilibrio.

- Analisi di stabilità locale della parete est.

Le analisi di stabilità locale della parete est sono state condotte con metodi all'equilibrio limite e agli elementi finiti. Le analisi si sono concentrate nell'area sottostante la strada di accesso alla fortezza di San Leo ove è presente un'importante placca rocciosa il cui crollo potrebbe compromettere la viabilità stradale e la sicurezza dei mezzi e delle persone che vi transitano. Occorre precisare che le indagini effettuate consentono ragionevolmente di ritenere che il crollo avvenuto il 27 febbraio 2014 non ha prodotto risentimenti significativi e visibili nell'area in oggetto. La stabilità della placca in esame non risulta quindi sostanzialmente modificata a seguito degli eventi recentemente occorsi.

Il meccanismo di dissesto più probabile è quello di scivolamento planare lungo le discontinuità della famiglia K4, disposte a franapoggio in questa porzione della Rupe. Le analisi di stabilità condotte portano a concludere che le verifiche sono soddisfatte solo potendo ipotizzare la presenza di una certa percentuale di ponti di roccia lungo le fratture della famiglia K4. Purtroppo, la quantificazione della percentuale di ponti di roccia non è verosimilmente determinabile in sito con sufficiente attendibilità e precisione.

7. Gli scenari di rischio

Dopo il crollo è stato necessario definire un primo scenario di rischio, "scenario di rischio 1", ritenendo plausibile una riattivazione del dissesto: è stato perciò valutato in via cautelativa il potenziale interessamento di un'ampia area attorno al crollo, comprendente 5 edifici: abitazione privata, condomini 1 e 2, Caserma dei Carabinieri e la scuola materna - elementare (area rossa nella Fig. 37). Ovviamente, è stata considerata a rischio anche l'area ai piedi della parete che comprende tutto l'accumulo di frana.

L'interdizione dell'area ha comportato l'evacuazione di 15 persone e una sistemazione provvisoria per le attività scolastiche e la Caserma dei Carabinieri.

I primi rilievi eseguiti e l'impiego del radar interferome-



Fig. 36 - Fascia di parete rocciosa intensamente fratturata con intersezione dei due sistemi di frattura K1 e K4.

trico assieme all'avvio del monitoraggio strumentale di fase 1 (controllo delle fratture in superficie), a partire dal 18 aprile 2014, hanno consentito di aggiornare il primo scenario di rischio, elaborato subito dopo il crollo.

Con il nuovo scenario, denominato "scenario di rischio 2", l'area attorno al crollo è stata suddivisa in 4 zone: zona A, B1, B2 e C (Fig. 38).

Zona A. La strada di circonvallazione è stata ritenuta non più agibile perché esposta ad elevato rischio per un tratto di circa 100 metri (prossima al ciglio della parete rocciosa e interessata da fratture significative e piani di discontinuità della roccia a franapoggio). È stata perciò proposta la realizzazione di un percorso alternativo lontano dal ciglio e dell'area potenzialmente instabile.

Zona B1. La casa privata, prossima al ciglio della scarpata, e il Condominio 1 rientrano in un'area che, al momento, è ancora da considerarsi a rischio molto elevato e pertanto si è ritenuto di mantenere il vincolo di non agibilità con la condizione che a conclusione dello studio e installato il sistema di monitoraggio della fase 2, sarebbero state rivalutate le condizioni di rischio di entrambi i fabbricati e quindi di agibilità.

Zona C. La caserma dei carabinieri, il condominio 2 e la scuola sono apparse collocate in una fascia a minore rischio, esterna alle aree di potenziale coinvolgimento per evoluzione del dissesto. È stato ritenuto, pertanto, possibile rimuovere il vincolo di inagibilità alle seguenti condizioni: attivazione del monitoraggio di fase 1 e definizione del Piano di emergenza di Protezione Civile correlato.

Zona B2. Gli studi condotti hanno evidenziato che la zona del tornante della strada di accesso alla fortezza non rientra fra le aree di coinvolgimento del crollo del febbraio 2014, né si rilevano risentimenti visibili/tangibili riconducibili al crollo. Tuttavia, i primi rilievi in parete hanno evidenziato un'intrinseca situazione di rischio legata alla prossimità della strada al ciglio di scarpata e alla presenza di fratture significative. Relativamente alla riapertura della strada, è stato ritenuto quindi indispensabile portare a compimento un approfondimento delle indagini (geognostica profonda) ed estendere anche a questo settore il monitoraggio di fase 2 (controllo delle fratture profonde).

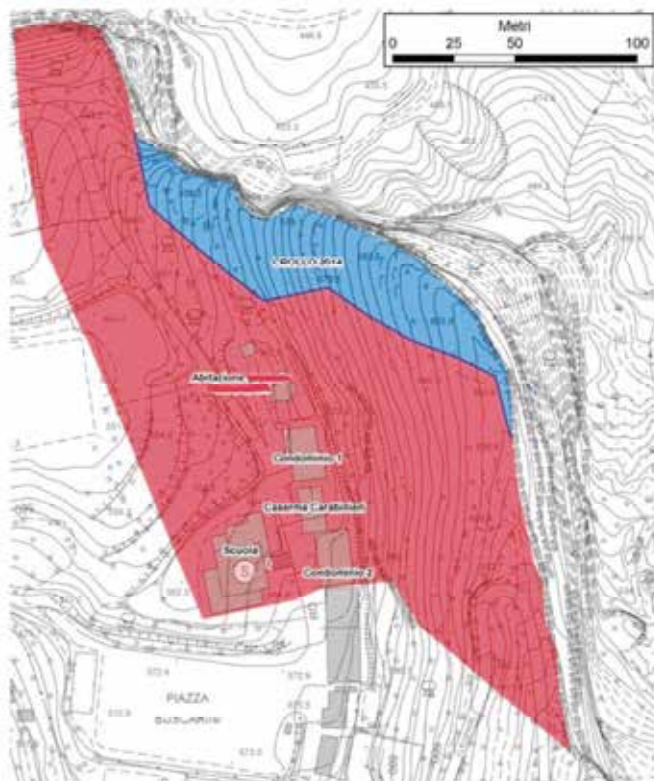


Fig. 37 - Primo scenario di rischio ("scenario di rischio 1", 28 febbraio 2014) con l'individuazione di un'ampia area a rischio evacuata (area rossa).

Il sondaggio verticale profondo e l'installazione degli estensimetri in foro nella zona del tornante (controllo delle fratture in profondità, luglio 2014) e le risultanze delle prime verifiche di stabilità hanno consentito di aggiornare il secondo scenario di rischio. Tale aggiornamento, che ha portato alla definizione dello "scenario di rischio 3", non ha comportato una modifica cartografica ma ha solamente variato i vincoli all'interno della zona B2, relativa alla via di accesso alla fortezza. L'aggiornamento ha consentito di riaprire l'accesso alla fortezza con l'utilizzo di navetta autorizzata con numero limitato di corse. Il monitoraggio di fase 2 (controllo delle fratture in profondità), la cui installazione è stata da poco completata, e le ulteriori verifiche di stabilità alla luce dei nuovi dati strutturali e geomeccanici potranno consentire di aggiornare il terzo scenario di rischio, attualmente in vigore. A tutt'oggi risultano ancora evacuate alcune famiglie.

8. Conclusioni

Il crollo della rupe di San Leo del 27 febbraio 2014 è stato un evento di portata eccezionale per dimensioni e complessità, che ha richiesto un notevole impegno tecnico-scientifico e un'assunzione di responsabilità in relazione al tema della pubblica incolumità. Attraverso l'intensa attività di studio condotta e descritta in queste pagine, si vogliono sottolineare due aspetti, sul piano tecnico, risultati determinanti nella gestione dell'emergenza:

1. l'approccio multidisciplinare attraverso l'impiego di diverse tecniche di rilievo e di indagine che hanno fornito elementi conoscitivi essenziali;
2. la messa a punto di un sistema di monitoraggio inte-

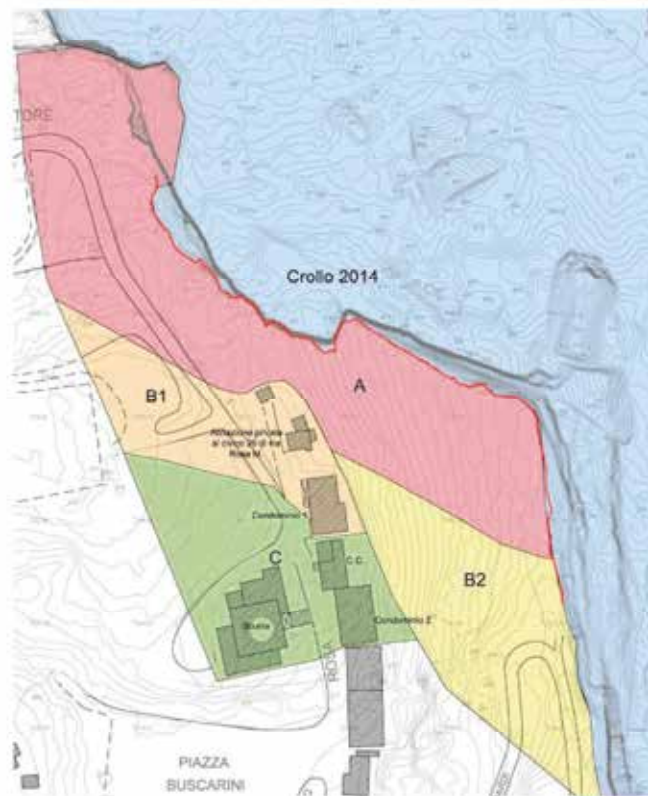


Fig. 38 - "Scenario di rischio 2" (22 aprile 2014) con l'individuazione di 4 aree a diverso rischio limitando l'interdizione definitiva alla sola fascia A (rossa) intorno al ciglio della parete di crollo.

grato, attraverso l'impiego del radar da terra per il controllo del fronte di crollo e l'installazione di una serie di sensori per il controllo delle principali fratture in superficie e in profondità, all'interno dell'ammasso roccioso.

Lo studio multidisciplinare e il monitoraggio integrato hanno fornito le necessarie conoscenze e il supporto tecnico per definire gli scenari di rischio risultati essenziali a livello decisionale, sperimentando, in tal modo, sul campo un metodo di lavoro che si è dimostrato efficiente e puntuale nei tempi di risposta.

L'evento franoso del febbraio 2014 ha, inevitabilmente, catalizzato su di sé tutta l'attenzione mediatica e le risorse per affrontare l'emergenza ma non va assolutamente trascurato lo stato di rischio in cui versa la parete sud, sede dell'abitato e dell'unica via di accesso, e la parete est, sottostante la fortezza. In tal senso, si ritiene opportuno estendere la metodologia di indagine adottata per l'evento "febbraio 2014" a tutta la rupe di San Leo attraverso l'esecuzione di: rilievi con drone in parete, rilievi con laser scanner, rilevamento geologico e geomeccanico, sondaggi profondi e indagine geofisica (sismica a riflessione). Lo stesso vale per il monitoraggio dal momento che aree della rupe a rischio molto elevato (abitato e fortezza) sono attualmente prive di sistemi di controllo. Tutta l'attività conoscitiva sinora svolta, già prima del crollo del febbraio 2014, e quella in previsione, estesa a tutta la rupe di San Leo, ha come fine ultimo (e ambizioso) un progetto generale di interventi di mitigazione del rischio che prevede il consolidamento della rupe e delle aree limitrofe, ai piedi della rupe stessa.

Ringraziamenti

Si coglie l'occasione per ringraziare tutti coloro che hanno fornito al Servizio Tecnico di Bacino Romagna, a diverso titolo, il proprio contributo tecnico-operativo nell'affrontare l'emergenza "San Leo": Agenzia regionale di Protezione Civile, Protezione Civile provinciale, Comune di San Leo, Enser (G. Marchi, G. Benedetti, F. Sciascia), Università di Bologna (L. Borgatti, G. Bitelli, M. Berti, D. Boldini, A. Landuzzi, C. Guerra, M.C. Spreafico), Università di Modena e Reggio-Emilia (A. Corsini), Alpigeo (G. Giacchetti, N. Doglioni, M. Di Giusto), Sal Engineering (M. Dubbini), Land Service (M. Martintoni), Waterstones (M. Rinaldi, G. Piffer), Field (G. Merati), OTR (E. Chini, P. Valesini), Tecnoin (L. Lambertini, M. Uliano), Geomonitoring service (G. Dragà) Università di Firenze (N. Casagli).

Bibliografia

BADIOLI LUCREZIA (2012). Studio Geologico e strutturale della Rupe di San Leo. Tesi di laurea triennale - relatore G.A. Pini, correlatore C.C. Lucente. Corso di laurea in Scienze Geologiche - Università degli studi di Bologna, AA 2011-2012.

BENEDETTI G., BERNARDI M., BORGATTI L., CONTINELLI F., GHIROTTI M., GUERRA C., LANDUZZI A., LUCENTE C.C., MARCHI G. (2013). San Leo: centuries of coexistence with landslides. In: Margottini C., Canuti P., Sassa K (eds) *Landslide science and practice*. Springer, Berlin, 6, pp 529-537

BENEDETTI GIANLUCA, BERNARDI MATTEO, BONAGA GILBERTO, BORGATTI LISA, CONTINELLI FRANCESCA, GHIROTTI MONICA, GUERRA CRISTIANO, LANDUZZI ALBERTO, LUCENTE CLAUDIO CORRADO, M.G., 2013. SAN LEO: CENTURIES OF COEXISTENCE WITH LANDSLIDES C. MARGOTTINI, P. CANUTI, & K. SASSA, EDS. *LANDSLIDE SCIENCE AND PRACTICE*, 6(IV), PP.529-537. AVAILABLE AT: [HTTP://LINK.SPRINGER.COM/10.1007/978-3-642-31319-6](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-31319-6) [ACCESSED JANUARY 14, 2015].

BORGATTI L., GUERRA C., NESCI O., ROMEO R. W., VENERI F., BENEDETTI G., LANDUZZI A., MARCHI G. LUCENTE C.C. (2014). The 27th February 2014 San Leo rock fall (northern Italy). *Landslides*, DOI <http://link.springer.com/10.1007/s10346-015-0559-4>.

CANCELLI A., PELLEGRINI M. (1987). Deep seated gravitational deformations in the Northern Apennines, Italy. 5th Int. Conf. and Field Workshop of Landslides, Australia e New Zealand

CATURANI A., RIBACCHI R., TOMMASI P. (1991). The San Leo Cliff (Italy): stability conditions and remedial measures. VII ISRM Int. Congr. on Rock Mechanics, Aachen, 2, pp 853-858.

CONTI S. (1994). La geologia dell'alta Val Marecchia (Appennino tosco-marchigiano). Note illustrative alla carta geologica 1:50.000. *Atti Tic. Sc. Terra*, 37, 51-98.

DE FEYTER A.J. (1991). Gravity tectonics and sedimentation of the Montefeltro, Italy. *Geol. Ultraiect.*, 35, 1-168.

LUCENTE C.C., MANZI V., RICCI LUCCHI F., ROVERI M. (2002). Did the Ligurian sheet cover the whole Romagna Apennines? *Boll. Soc. Geol. It.*, Volume speciale 1, 385-392.

GUERRA C., NESCI O. (2013). L'analisi del paesaggio storico come strumento per la comprensione dell'evoluzione morfologica e ambientale del territorio. Alcuni casi studio nel Montefeltro. *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, Anno XIV/2013, n. 48 - 49 - Nuova Serie, 7-15.

RICCI LUCCHI F. (1986). The Oligocene to Recent foreland basins of the northern Apennines. *International Association of Sedimentologists Special Publication*, 8, 105-139.

RICCI LUCCHI F., ORI G.G. (1985). Field excursion D: syn-orogenic deposits of a migrating basin system in the NW Adriatic foreland. In Allen P.H., Hornwood P. & Williams G. Eds., *Excursion Guidebook, Foreland Basin Symp.*, Fribourg, 137-176.

ROVERI M., ARGNANI A., LUCENTE C.C., MANZI V., RICCI LUCCHI F. (1999). Guida all'escursione nelle Valli del Marecchia e del Savio. Riunione Autunnale del Gruppo Informale di Sedimentologia.

RUGGERI G. (1958). Gli esotici neogenici della colata gravitativa della Val Marecchia (Appennino Romagnolo). *Atti Acc. Sc. Lett. e Arti Palermo*, 17, 7-169

SPREAFICO M.C., FRANCONI M., CERVI F., STEAD D., BITELLI G., GHIROTTI M., GIRELLI V.A. LUCENTE C.C., TINI M.A., BORGATTI L. (in press). Back analysis of the 2014 San Leo landslide using combined terrestrial laser scanning 3D distinct element modelling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.

