

Bollettino Ufficiale d'Informazione dell'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna

il GEOLOGO

DELL'EMILIA-ROMAGNA



2018

Nuova serie • numero 5/6



CTD Logger multiparametrico (conducibilità, temperatura, pressione)

- Precisione / scala di conducibilità del sensore:
 $\pm 1\%$ max. / 0,2...200 mS/cm
- Precisione / sensore Pt1000 per monitorare la temperatura:
 $\pm 0,1\text{ }^\circ\text{C}$ / -10...40 $^\circ\text{C}$
- Precisione / campo di pressione (profondità):
 $\pm 0,02\%$ FS max. / 5...200 m
- Applicazioni:
monitoraggio della qualità dell'acqua e del livello



Competenza nella idrologia

Unità di trasmissione dati a distanza GSM

- Logger multiparametrico
- Trasmissione dei dati via e-mail, FTP oppure SMS
- Multifunzionale
- Durata della batteria fino a 10 anni
- Facilità d'installazione
- Software incluso

Logger di pressione e temperatura

- Autonomo
- Di facile uso
- Durata della batteria fino a 10 anni
- Applicazioni:
 - Acqua dolce
 - Acqua salata
 - Acqua sporca
- Ottenibile in acciaio Inox,
Hastelloy oppure in Titanio





il GEOLOGO

DELL'EMILIA-ROMAGNA

Bollettino Ufficiale d'Informazione dell'Ordine
dei Geologi della Regione Emilia-Romagna
Nuova serie - numero 5-6/2018

Registrato al Tribunale di Bologna
con il n. 6496 dal 7/11/1995

Direttore Responsabile
Maurizio Zaghini

Comitato di Redazione
Paride Antolini, Livia Soliani, Nicola Caroli,
Dario Grundler, Anna Rita Bernardi,
Andrea Graziani, Alberto Guiducci,
Fabio Parmeggiani, Mariantonietta Sileo,
Giovanni Truffelli, Marco Ugolotti

Segreteria di Redazione
Annalisa Parisi

Direzione e Redazione centrale
Via Guerrazzi, 6, 40125 Bologna
Tel. e Fax 051 2750142
info@geologiemiariomagna.it

Comitato Scientifico
Matteo Berti, Lisa Borgatti,
Doriano Castaldini, Silvia Castellaro,
Alessandro Chelli, Maria Teresa De Nardo,
Monica Ghirelli, Marco Marcaccio, Giorgio Neri,
Marco Pizziolo, Fabrizio Vannelli

Pubblicità
Agicom srl
Viale Caduti in Guerra, 28
00060 Castelnuovo di Porto (RM)
Tel. 069078285 - fax 069079256
agicom@agicom.it
www.agicom.it

Creatività e Grafica
Agicom srl

Stampa
Spada Media srl

Chiuso in tipografia Febbraio 2019.

SOMMARIO

LETTERA DEL PRESIDENTE 3

OPINIONE DEL DIRETTORE 5

Monografia

**SAN LEO:
LA CONOSCENZA E IL MONITORAGGIO
COME STRUMENTI INDISPENSABILI
DI PREVENZIONE E MITIGAZIONE DEL RISCHIO** 7

LA GEOLOGIA DELLA RUPE DI SAN LEO 8
A. Landuzzi, C.C. Lucente, L. Borgatti, G.A. Pini

**GEOMETRIA E STRUTTURE DELLA RUPE
DI SAN LEO ATTRAVERSO L'INVESTIGAZIONE
CON SISMICA A RIFLESSIONE, PRIMI RISULTATI** 18
*A.E. Bracci, C.C. Lucente, G. Mainardi, A. Peraccini,
L. Borgatti, A. Landuzzi*

**IL MONITORAGGIO GEOTECNICO
DELLA RUPE DI SAN LEO** 25
L. Borgatti, C.C. Lucente

**L'IMPIEGO DEL DRONE NEL MONITORAGGIO
DELLA FRANA DI CROLLO DELLA RUPE DI SAN LEO** 39
M. Dubbini, C.C. Lucente

IN COPERTINA:

Vista da Est della città di San Leo, rappresentata nell'acquerello di Francesco Mingucci datato 1626. Da allora le rupi del lato orientale sono arretrate di diverse decine di metri a causa di ripetuti grandi fenomeni franosi, di cui l'ultimo nel febbraio 2014, coinvolgendo uno dei due originali accessi alla città, porzioni della fortezza e alcune abitazioni. Indicazione bibliografica del dipinto: Mingucci F. "Stati, domini, città, terre e castella dei Serenissimi Duchi e Principi della Rovere tratti al naturale (1626)".
(Foto di copertina e didascalia fornite dal Geol. Cristiano Guerra)

L'Ordine declina ogni responsabilità in merito ai contenuti dell'inserimento redazionale che è a cura della Ditta scrivente.

Si invitano gli iscritti a comunicare il proprio indirizzo e-mail per rendere più efficiente e rapido il servizio di comunicazione delle informazioni dell'Ordine.

La redazione invita i colleghi Geologi a partecipare attivamente alla vita del periodico, con articoli di interesse generale.

Il materiale va spedito alla sede dell'Ordine Regionale in Via Guerrazzi, 6 - 40125 Bologna.

È espressamente vietata la riproduzione di testi e foto ai sensi e per gli effetti dell'Art. 65 della legge n. 633 - 22/04/1941.

GEOSTRU Infinite soluzioni.

Software Desktop

GeoAPP

Geostru
365

Geostru
VisionTime

GeoFormazione

Gestionale e
E-Fatturazione

GEOSTRU TI OFFRE INFINITE E INNOVATIVE SOLUZIONI E STRUMENTI DI LAVORO

Dal software desktop al software in cloud per geologia, gestione ufficio e contabilità, soluzioni e strumenti di lavoro in mobilità, servizi di formazione e consulenza e tanto altro ancora. Tutto questo è l'universo GeoStru, infinite soluzioni e combinazioni per professionisti.



SOFTWARE Desktop

Ingegneria - Geologia e Geotecnica
Meccanica delle rocce - Prove in situ - Idrologia
e Idraulica Topografia - Energia - Geofisica
scopri di più su: <https://www.geostru.eu/it/>

**Software aggiornati alle NTC 2018
e BIM compatibili secondo lo standard
AGS**



Gestionale e Fatturazione elettronica

Accedi ai nostri servizi di contabilità e fatturazione elettronica su www.smartbill.it



GeoStru VisionTime

Gestione e Archiviazione Documenti Studio Tecnico

Archiviare in cloud la documentazione dello studio tecnico, unendo informazioni geografiche all'archiviazione di qualsiasi tipo di documento in formato elettronico.

scopri di più su: <https://visiontime.geostru.com/>



GeoStru 365

Utilizza i nostri software online ovunque

Nessuna limitazione rispetto ai software commerciali, è possibile: importare, elaborare, stampare ed esportare.

Nessuna installazione o configurazione. Accedi online e inizia!

scopri di più su: www.geostru365.com



GeoFormazione

Formazione professionale certificata con crediti formativi

Dai più valore alla tua Professione scegli i nostri corsi accreditati.

scopri di più su: www.geoformazione.eu



GeoAPP

Oltre 50 applicazioni in cloud pensate per la tua professione

scopri di più su: <https://geoapp.geostru.eu/>

Software, risorse,
info, servizi e offerte
sul nostro sito:
www.geostru.eu



Leggi il QR code per il tuo codice sconto



di **PARIDE ANTOLINI**

Ordine dei Geologi dell'Emilia-Romagna

TRA CHIARO E SCURO

Ben ritrovati cari colleghi; il titolo è provocatorio, ma rispecchia la situazione quotidiana in cui ci troviamo ad operare come professionisti e come conducenti della “macchina ordinistica”; l'incertezza interpretativa delle leggi, il continuo variare delle stesse, non aiuta la programmazione e l'investimento per la crescita delle nostre attività. Mi spiace aver dovuto modificare anche quest'anno la modalità di pagamento della quota di iscrizione all'Ordine dei Geologi modificata rispetto a quanto era stato preannunciato nell'assemblea del 18 dicembre scorso e sono, al momento in cui scrivo, in corso di aggiustamento; d'altra parte tali modalità sono state comunicate ad OGER a partire dagli ultimi giorni di novembre del 2018.

IL DILUVIO UNIVERSALE 2.0

2-3 febbraio 2019: abbiamo la Sindaca di Argelato che chiede aiuto per i suoi cittadini, il Sindaco di Budrio che lancia un appello ai volontari che insieme a lui possano andare a dare una mano a spalare il fango a Castel Maggiore, il Sindaco e l'assessore di Baricella che passano la notte a presidiare gli argini per poter dare l'eventuale allarme. Tutto questo perché ha piovuto. Ha piovuto! Non c'è tsunami, non c'è monzone, non è arrivato nemmeno il mitologico diluvio universale “predicato dai testimoni degli ultimi giorni”. Piove e siamo in inverno. Ma salvare la Terra non porta consensi, preoccuparsi del territorio che va in malora è roba per quei naïf dei verdi (ma esistono?), i geologi sono patetiche cassandre che predicono sventure e domani, perché purtroppo in queste cose c'è sempre un domani, parleremo di cose più serie.

GEOLOGIA, GEOTECNICA, CORSI E CONVEGNI

Con rammarico vediamo organizzazioni di corsi di formazione di geotecnica con l'inserimento di soli docenti ingegneri, che trattano, peraltro, argomenti strettamente legati alla geologia o propriamente della geologia, senza coinvolgimento di geologi ed escludendo di fatto la geologia stessa.

È necessario, molto verosimilmente, puntualizzare alcuni concetti, altrimenti si rischia di continuare ‘sine die’ con queste situazioni di ambiguità che non portano ad un reale miglioramento della qualità del mondo dei professionisti tecnici, ma contribuiscono certamente al peggioramento.

La geotecnica è una scienza che si pone fra l'ingegneria e la geologia, e per questo motivo è materia concorrente tra geologi e ingegneri. Obiettivo della geotecnica è descrivere in termini numerici le caratteristiche dei terreni e delle rocce facendo riferimento a modelli empirici e sperimentali, consentendo all'ingegneria delle strutture e all'ingegneria geotecnica (chiaramente distinta dalla geotecnica in senso stretto) una corretta progettazione delle opere.

Ruolo della geologia, intesa in senso lato, è la conoscenza della “natura”, delle dinamiche e delle morfologie dei terreni sui quali andare a costruire. L'ingegneria non sarà mai capace di contestualizzare il terreno su cui realizzare le opere, perché non ne ha la conoscenza e la competenza; solo la geologia può contribuire in maniera efficace e determinante a fornire le informazioni necessarie per la costruzione di un modello che si approssimi il più possibile alla realtà.

È dalla migliore interpretazione dell'interazione terreno-strutture che deriva la sicurezza dell'opera costruita, sia da fattori endogeni, come per esempio la qualità dei manufatti, che esogeni quali il dissesto idrogeologico, i terremoti o altri fenomeni naturali.

In estrema sintesi, si può dire che la vera prevenzione avviene nel momento in cui è possibile realizzare un'opera all'interno di un contesto geologico noto, costruendo strutture con le migliori tecniche disponibili per ottenere la più alta compatibilità con i livelli di rischio stimati.

In questi anni i professionisti e il mondo accademico della geologia sono stati progressivamente isolati e privati di gran parte delle loro competenze, sia nel settore privato che in quello pubblico, in seguito all'abbandono della cura del territorio, in favore di un approccio sempre più ingegneristico e legato anche alla cosiddetta protezione civile: come se avere una struttura molto “robusta” e una capacità di rispondere alle emergenze scongiurasse dal rischio a cui siamo esposti. La ammirevole capacità di risposta alle emergenze della protezione civile è divenuta, fatti salvi tutti gli operatori, la “prevenzione del giorno dopo”.

Se vogliamo realmente iniziare a fare qualcosa per la “prevenzione” occorre tenere ben presenti i ruoli e le competenze del mondo delle professioni tecniche e investire sempre più nella direzione della specializzazione e complementarità di queste, esaltando il ruolo di tutte le categorie, nessuna esclusa.

E proprio una Regione come la nostra, caratterizzata da gravi problemi che riguardano la geologia (alluvioni, frane, terremoti, subsidenza, liquefazione ecc.), è chiamata, avendo fatto per anni in questo campo da apripista nel Paese, ad investire fortemente in questa direzione, superando l'attuale moda dell'ingegnerizzazione di tutto il possibile, e relegando la geologia ad un ruolo fortemente secondario, e non da protagonista, quale dovrebbe ineludibilmente avere, per raggiungere l'obiettivo della sicurezza del territorio e delle opere dell'uomo.



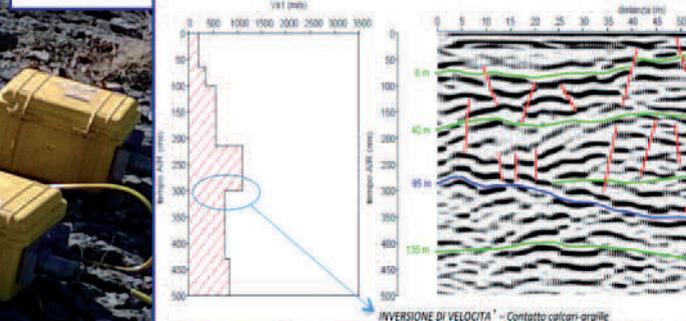
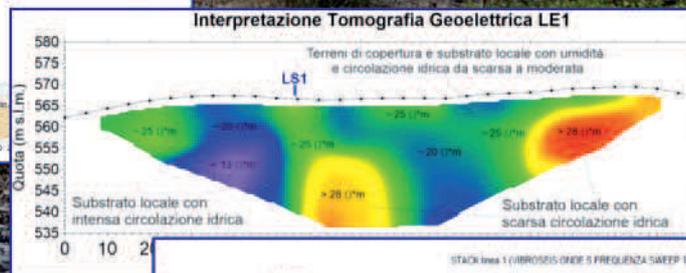
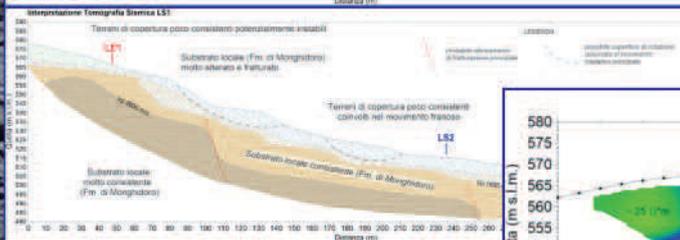
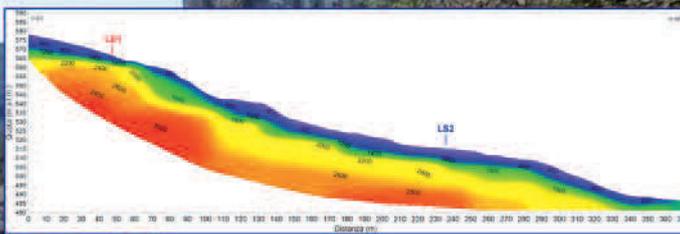
GeoExploration

www.geoexploration.net

srl

GeoExploration srl, società specializzata in **prospezioni geofisiche**, svolge attività di ricerca e servizi tecnico-scientifici relativi ai settori della **geologia**, della **geotecnica**, dell'**ingegneria edile**, del **dissesto idrogeologico** e delle **risorse naturali e archeologiche**, utilizzando le seguenti metodologie:

- **Tomografia Sismica a Rifrazione** in onde P e S
- **Sismica a Riflessione** ad alta risoluzione con tecniche esclusive **Vibroseis** in onde P e S (vedasi articolo nella presente rivista)
- **Sismica ad onde di superficie** (MASW) e **Microtremori** (REMI, ESAC, HVSR)
- **Sismica in foro** (Down-Hole, Cross-Hole)
- **Sondaggi Elettrici verticali** (SEV) e **Tomografie Geoelettriche** (ERT)
- **Indagini Georadar** multifrequenza (GPR)
- **Rilievi Elettromagnetici** (EM, FDEM)



GeoExploration srl

Via Giordano Bruno 19 - 47121 Forlì (ITALY) - info@geoexploration.net

- Dott. Ing. **Giuseppe Mainardi** (Amministratore Unico)
+39 335 5306642 - giuseppe@geoexploration.net
- Dott. Geol. **Diego Peraccini** (Direttore Area Tecnica)
+39 328 7168492 - diego@geoexploration.net

Opinione del Direttore

a cura di Maurizio Zaghini

E TANTO TUONÒ CHE PIOVVE

Cari lettori della carta stampata (ancora per poco!). Questo è l'ultimo numero della nostra Rivista che va in stampa in formato cartaceo. Esigenze ineludibili di contenimento dei costi portano al passaggio della Rivista dal formato cartaceo a quello digitale. Da una parte la cosa mi rammarica alquanto tornandomi alla mente il ruolo che mi venne conferito, diversi lustri fa, dal Consiglio dell'Ordine presieduto dal compianto Gianfranco Bruzzi. Allora la Rivista era a un livello 'pre-comatoso' e attraverso l'aiuto di poche persone gradualmente l'abbiamo portata a un livello significativo nella schiera delle altre Riviste regionali. Il numero monografico che pubblichiamo sulla rupe di S.Leone è una dimostrazione. La Rivista non scompare ovviamente (rimane tal quale nel formato digitale) e spero, nel caso le finanze lo consentano, di ritornare presto all'edizione cartacea. Per quanto riguarda il titolo dell'Opinione non sto a ripetere quanto ben espresso dal nostro Presidente.



Ripeto quindi concetti già affrontati. Possibile che le previsioni del tempo si siano trasformate in veri bollettini di guerra?

Ovviamente in questo paese la pianificazione territoriale e il concetto di prevenzione sono considerati degli *optionals*.

Non è un problema di conoscenze, che ci sono, ma è un problema squisitamente politico.

La politica opera in tempi sempre più brevi (nell'ordine di anni) a differenza della pianificazione territoriale che richiede l'ordine di

decenni. In tutto ciò come possiamo (se possiamo) incidere noi geologi? Stando a quanto pubblicato tempo fa sull'Amaca di Repubblica (del dicembre 2018) da Michele Serra molto poco.

Non possiamo fare altro che sollecitare le nostre rappresentanze nazionali e regionali a rendersi sempre più visibili e di coinvolgere in questo le forze politiche.

Con gli attuali sommovimenti della politica la cosa dovrebbe essere possibile. Qualche cosa in termini di consapevolezza fa ben sperare.

Bollettino Ufficiale d'Informazione dell'Ordine dei Geologi della Regione Emilia-Romagna

il GEOLOGO
DELL'EMILIA-ROMAGNA
www.geologiemiariomagna.it

Dal prossimo numero ESCLUSIVAMENTE in formato digitale



CARO DIRETTORE, ho letto con interesse l'editoriale introduttivo al numero 4 de "Il Geologo dell'Emilia Romagna". Non posso che condividere le Tue riflessioni, giacché anch'io continuo a far tesoro dell'indirizzo naturalistico ereditato dall'Università di un tempo. Il ritrovarsi a casa propria sbarcando in un Paese sconosciuto è il retaggio di quella formazione di base. Ma poi si deve rispondere a Chi ti ha spedito laggiù, che ti chiede cosa fare e come farlo. La Geomorfologia è utile per comprendere certi fenomeni, a volte può prevenirli, ma non basta a risolvere le loro conseguenze, tanto meno a studiare le fondazioni di un'opera in pianura. Inevitabile il ricorso alla Geotecnica. Dalle nostre parti si devono rispettare le Norme Tecniche per le Costruzioni, che descrivono in 15 righe il contributo della Geologia applicata all'Ingegneria. Come svolgere un tema posto in quella sintesi?

In una relazione che ho avuto la pazienza di leggere di recente, le righe e le immagini occupano 477 pagine, nemmeno il record assoluto. Non è il risultato di una ricerca particolarmente impegnativa condotta in una regione esotica. Essa riguarda l'ampliamento di un edificio industriale in un'area della Pianura padana. Quell'opera omnia riporta la miriade di notizie che il Progettista salta, sperando di trovare alla fine quelle necessarie per disegnare le prosaiche opere di fondazione.

Ma le risposte sono rimandate al Progetto delle medesime, segno che il Geologo e l'Ingegnere si sono ben guardati dal presentare una squadra al Committente e che quest'ultimo ha conferito incarichi basandosi su criteri discutibili. Giacché si vedono spesso prodotti di quel tipo, non è il caso di muovere critiche ai Normatori, che si limitano a prendere atto della sostanza da attendersi dai Geologi, in termini statistici, ovviamente. Sul versante opposto, diversi Colleghi non sembrano interessati a svincolarsi da quel campione rappresentativo, cullandosi nel copia-incolla che fa volume ed evita l'assunzione di responsabilità progettuali. Da entrambe le parti aleggia l'insipienza di quanto utile e proficua possa essere l'interazione intelligente tra le discipline in oggetto. Ma, come non è usuale mettere in comune il proprio orticello per migliorare coi vicini la caccia alle lumache, così gl'Ingegneri (non tutti, fortunatamente) si arroccano nella tecnica trascurando la cultura ed i Geologi (non tutti, altrettanto fortunatamente) fanno l'esatto contrario. È tuttavia opportuno ricordare ai Geologi che la cultura non è il riciclo di nozioni fritte e rifritte, piuttosto essa dovrebbe fornire agli Ingegneri gli occhiali per vedere la terra in trasparenza. Che si tratti di un dipinto, di un brano musicale o di un aspetto della Natura, l'allenamento mentale teso a ricercare i motivi di fondo orienta al meglio ogni sviluppo tecnico. I corsi universitari non favoriscono granché il dialogo interdisciplinare, piuttosto sembra che ogni elemento dell'orchestra pretenda d'interpretare il ruolo del solista. Nel frattempo, lo sviluppo della nostra Professione ha reso la Geotecnica una sorta di spartito da suonare con gl'Ingegneri. Volendo evitare dissonanze, sarebbe il caso di stabilire quanta

"geo" e quanta "tecnica" formano il connubio propedeutico alla Geotecnica stessa, per non ridurre quest'ultima ad un esercizio prettamente meccanicistico da un lato, o al fumo di una sigaretta dall'altro. Contrariamente a quanto accade per i materiali artificiali, gli algoritmi che descrivono il comportamento di terre e rocce funzionano a dovere se sorretti dallo studio, dal ragionamento, dall'esperienza, dall'intuizione, dall'osservazione critica e via di seguito nell'elenco delle caratteristiche che ci distinguono dal computer. Poi quest'ultimo serve, eccome se serve, per rendere concreto quel processo intellettuale. Nelle nostre Università, ben pochi Docenti rinunciano a scrivere sulla lavagna una complessa equazione, così come Altri ad illustrare le peculiarità di un foraminifero. Cose ovviamente fondamentali per i cultori delle rispettive materie, ma forse dispersive se si vogliono formare Specialisti con la visione delle diverse facce di un prisma. Da qualche parte del mondo si parla di Engineering Geology, una scienza che in Italia è confinata nell'iniziativa di Attori con l'idea fissa di rendere il proprio contributo utile a chi lo richiede. Una specie destinata ad estinguersi se non si corre ai ripari, giacché i suddetti individui potrebbero finire per stancarsi, dovendo giustificare quotidianamente metodiche di studio e relativi investimenti a personaggi che, contando solo i quattrini, alimentano la schiera dei Dilettanti che non hanno modo di affrancarsi, perché nessuno ha spiegato loro che cosa studiare ed applicare. Alcuni trovano la forza di superare tale carenza con i propri mezzi, altri necessitano di un insegnamento mirato a contenere il divario con i primi. Il più delle volte, un buon allenamento a proporre ed ascoltare con cognizione di causa le diverse istanze serve ad aggiustare il tiro. Il nostro territorio è un mezzo disastro che richiede pezzi ovunque e le opere civili subiscono danni quando non crollano; viene dunque da chiedersi se sia giunto il tempo di svegliarsi dal lungo letargo accademico e professionale per preparare cervelli in grado d'integrare quanto d'utile alberga nell'Ingegneria e nella Geologia. Personalmente sono alquanto scettico che si attui una tale prospettiva in tempi ragionevoli se si conservano gli attuali ordinamenti, giacché le persone che avrebbero qualcosa da dire non si mettono in lista per concorsi, comitati scientifici, ecc. Sono impegnati ad inseguire i gasteropodi che prosperano nell'orticello comune, specie mutante contraddistinta da un'inusitata prolificità. I Maestri sarebbero da snidare uno ad uno, valutando quanto d'eccellente hanno accumulato nell'applicazione delle materie d'interesse. La rosa dei nomi è da richiedere a Chi ha tratto giovamento dal lavoro di quei Precursori, lasciando poi la selezione ai risultati conseguiti nell'attività delle nuove leve di Specialisti. Forse il senso civico ed un congruo assegno potrebbero indurre qualcuno, obtorto collo, a combattere le lumache in altro modo. Fantascienza!

*Cordiali saluti
Mario Mambrini*

SAN LEO:

LA CONOSCENZA E IL MONITORAGGIO COME STRUMENTI INDISPENSABILI DI PREVENZIONE E MITIGAZIONE DEL RISCHIO

L'abitato di San Leo, nel cuore della valle del Marecchia (Rimini, Emilia-Romagna), con la sua storica fortezza sorge su una rupe rocciosa isolata e circondata da terreni argillosi come gran parte dei borghi storici medioevali dell'Italia (es. Orvieto, Civita di Bagnoregio) che hanno dovuto fare i conti da sempre con il dissesto idrogeologico. Esistono testimonianze storiche come i dipinti del Vasari (1560) e del Mingucci (1626) e che mostrano una rupe di San Leo diversa e ben più estesa (vedi immagine di copertina): secoli di frane la hanno progressivamente ridotta così come la vediamo oggi. L'ultimo crollo in ordine di tempo, avvenuto nel 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, fortezza compresa.

San Leo è stato dichiarato "abitato da consolidare" ai sensi della L. 445/1908 con D.P.R. 217 del 18 gennaio 1951. Dal 2004, con adozione del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) Marecchia-Conca, tutta la fascia di territorio attorno alla rupe di San Leo è perimetrata, ai sensi della L. 267/1998, come area a rischio idrogeologico molto elevato.

Negli ultimi settant'anni sono stati eseguiti diversi interventi di consolidamento delle pareti rocciose, in particolare lungo la parete sud, sede dell'abitato e della via di accesso all'abitato stesso e lungo la parete est, nel settore occupato dalla fortezza. A partire dagli anni ottanta, gli interventi per la mitigazione del rischio hanno riguardato anche le aree ai piedi della rupe, con l'intento di ridurre l'azione erosiva dei fossi Campone e Seripa e impedire lo scalzamento alla base della rupe, che è stato all'origine dei grandi crolli come in occasione della frana del 2014. Nonostante gli interventi eseguiti nel passato, più o meno recente, il grado di rischio idrogeologico che caratterizza la rupe di San Leo rimane ancora elevato.

Con il crollo del 2014, la Rupe di San Leo è stata oggetto di un approfondito studio multidisciplinare che ha visto e vede l'impiego di diverse tecniche di indagine e di monitoraggio per la prevenzione e la mitigazione del rischio idrogeologico.

L'approfondimento conoscitivo è stato fondamentale nella gestione dell'emergenza all'indomani del crollo, fornendo gli elementi necessari per la definizione degli scenari di rischio e la formulazione del piano di emergenza di protezione civile. Inoltre, sulla base degli studi condotti in questi anni è stato possibile definire un modello geologico della rupe, riconoscere e descrivere i principali sistemi di discontinuità, risalire alle cause del dissesto e ai cinematismi che governano l'instabilità dell'ammasso roccioso. Le conoscenze sinora acquisite sono risultate indispensabili per la programmazione e la progettazione di ulteriori interventi di mitigazione del rischio (alcuni dei quali già realizzati, altri in fase di realizzazione e di progettazione), sebbene alcuni aspetti necessitino di ulteriori approfondimenti.

Nelle pagine a seguire sono illustrati alcuni dei risultati della complessa attività di studio che l'Agenzia per la sicurezza del territorio e la protezione civile ha portato avanti in questi anni con la collaborazione del mondo accademico e di società private. È anche l'occasione per trattare alcune metodologie di indagine del geologo, da quelle tradizionali come il rilevamento geologico a quelle che impiegano mezzi innovativi come il drone o sperimentano metodologie di indagine geofisica.

Il primo contributo presenta una revisione della geologia della Rupe di San Leo che ha fornito come prodotto finale una dettagliata e aggiornata carta geologica del sito. Essa rappresenta un punto di partenza nella modellazione geologica 3D dell'ammasso roccioso. La revisione geologica è stata anche l'occasione per analizzare i processi deformativi che la rupe di San Leo ha subito nel corso della sua storia geologica. Con il secondo contributo vengono illustrati i primi dati ottenuti attraverso l'indagine geofisica con la tecnica della sismica a riflessione. L'obiettivo prefissato è ricavare informazioni sull'andamento della base sepolta della rupe e sulla presenza e persistenza delle fratture all'interno dell'ammasso roccioso, concorrendo alla ricostruzione del modello geologico 3D della rupe. Il terzo contributo tratta il tema del monitoraggio attraverso l'illustrazione del sistema di monitoraggio geotecnico avviato a San Leo dopo il crollo del 2014. Si tratta di un sistema articolato e complesso, la cui gestione comporta un notevole impegno tecnico ed economico. Il sistema di monitoraggio in funzione a San Leo rappresenta, a tutti gli effetti, una misura non strutturale di mitigazione del rischio idrogeologico fornendo lo strumento per una ragionevole convivenza con il rischio. Infine, il quarto contributo presenta un esempio di monitoraggio mediante l'utilizzo del drone, che consente di eseguire rilievi topografici di dettaglio in tempi ridotti, con costi relativamente contenuti e senza esposizione al rischio dell'operatore, prerogative che rendono il rilievo con il drone facilmente ripetibile nel tempo.

Come noto, San Leo rappresenta di per sé un caso di estremo interesse e degno di nota sul piano del dissesto e del rischio geologico. L'auspicio è che quanto raccontato nelle pagine a seguire possa essere d'interesse e utilità al geologo che opera nell'ambito del dissesto idrogeologico dovendo fronteggiare, in particolare, le frane di crollo. Concludo con un doveroso ringraziamento rivolto ai responsabili e curatori della rivista dell'Ordine dei Geologi dell'Emilia-Romagna e ai co-autori dei contributi che hanno accolto con entusiasmo e partecipazione l'idea di un volume monografico dedicato al caso di San Leo.

C.C. Lucente
*Agenzia regionale per la sicurezza del territorio
e la protezione civile
Servizio Area Romagna, Rimini*

LA GEOLOGIA DELLA RUPE DI SAN LEO

A. LANDUZZI*, C.C. LUCENTE**, L. BORGATTI*, G.A. PINI***

* Geologo presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali DICAM – Università di Bologna

** Geologo presso l'Agenzia regionale per la sicurezza del territorio e la protezione civile – Servizio Area Romagna

*** Geologo presso il Dip. di Matematica e Geoscienze – Università di Trieste

1. PREMESSA METODOLOGICA

L'obiettivo principale di questo articolo è di presentare la nuova carta geologica in scala 1/2000 della Rupe di San Leo (versione ridotta in Figura 1). La carta è il primo passo dell'elaborazione di un modello tridimensionale che possa esprimere in modo immediato le relazioni tra stratigrafia, tettonica e geomorfologia che hanno determinato lo sviluppo di questa spettacolare e delicata forma del rilievo in Val Marecchia.

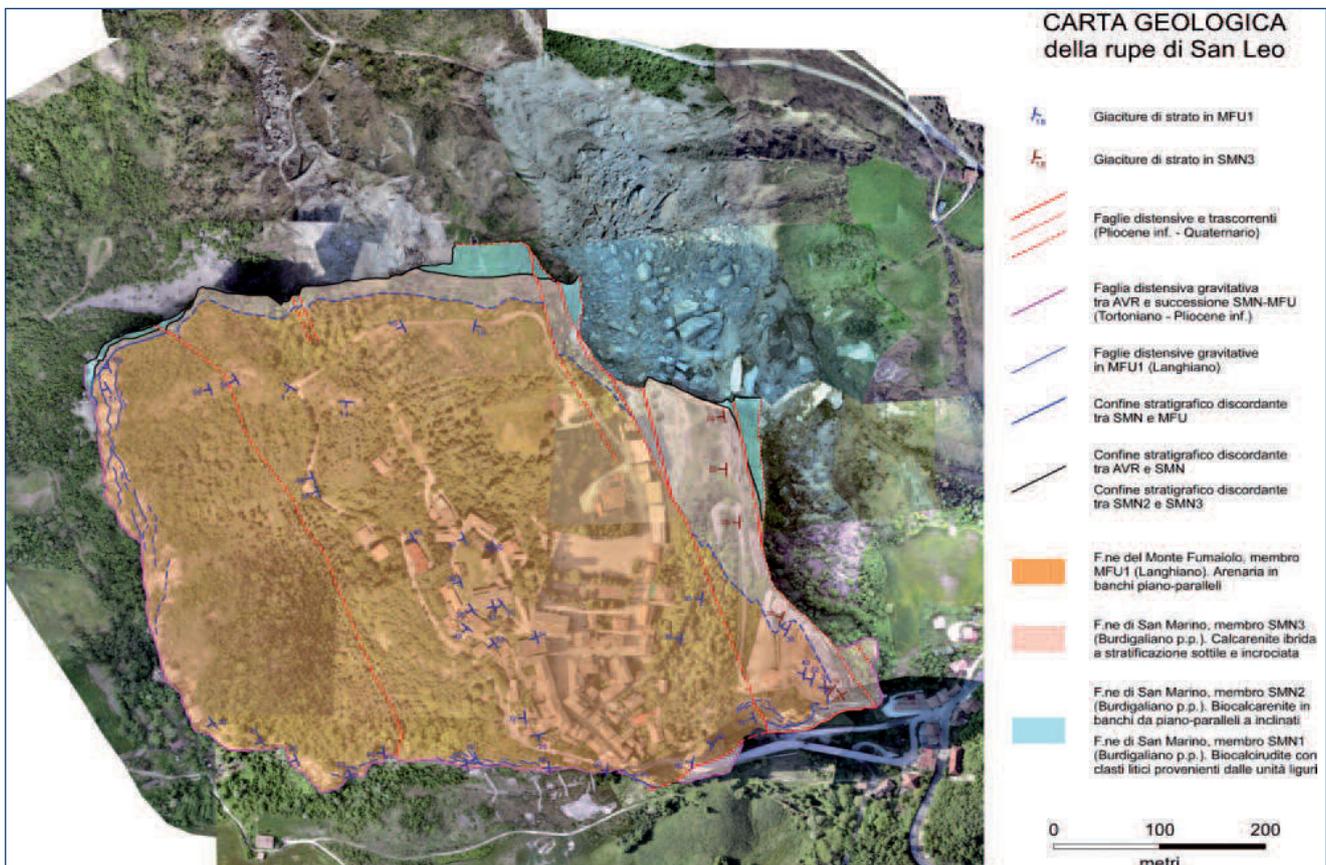
La realizzazione della carta si è articolata nelle seguenti fasi:

Acquisizione dei dati

I dati sono stati acquisiti nei modi seguenti. (a) Esame della cartografia recente: carte geologiche 1/50000 del progetto CARG (Fogli 255 – Cesena, 256 – Rimini, 266 – Mercato Saraceno e 267 – San Marino); carta geologica di Badioli (2012);

Figura 1.

I dati ricavati dai line-drawing delle pareti sono stati utilizzati per vincolare l'interpolazione dei confini stratigrafici e delle faglie nella carta geologica di dettaglio della Rupe di San Leo. In carta gli elementi tettonici più visibili sono: - la faglia distensiva di origine gravitativa che affiora alla base delle pareti E, S e W; - le faglie distensive e/o trascorrenti ad alto angolo che dislocano la faglia basale e l'intero ammasso roccioso della Rupe.



elaborati della relazione rif. ENSER sul crollo del 2014 (v. Lucente, 2014). (b) Esame ravvicinato degli affioramenti più accessibili (abitato, rocca medievale, strada di circonvallazione dell'abitato, parete S). (c) Esame a distanza degli affioramenti meno accessibili (pareti E, NNE, NNW e spigolo NW della Rupe). (d) Rilevamenti mirati tra M. S. Severino e Tausano, a San Marino e al Monte Fumaiolo, per inquadrare la successione di San Leo nel contesto regionale. (e) Interpretazione geologica sistematica di fotografie da terra e video da drone realizzati dalla SAL Engineering (v. Lucente, 2014).

Rappresentazione dei dati in carta

Gli affioramenti e i confini geologici sono stati tracciati sull'ortofoto da drone realizzata dalla SAL Engineering (v. Lucente, 2014); nei pendii poco acclivi, i confini geologici sono stati interpolati mediante le isoipse delle basi topografiche disponibili (pre-crollo 2006 e post-crollo 2014); nelle pareti rocciose verticali o strapiombanti, dove le isoipse risentono di gravi errori d'interpolazione, i confini geologici sono stati completati con l'integrazione tra i dati dell'ortofoto, i dati delle fotografie da terra e i video da drone.

Rappresentazione dei dati in line-drawing

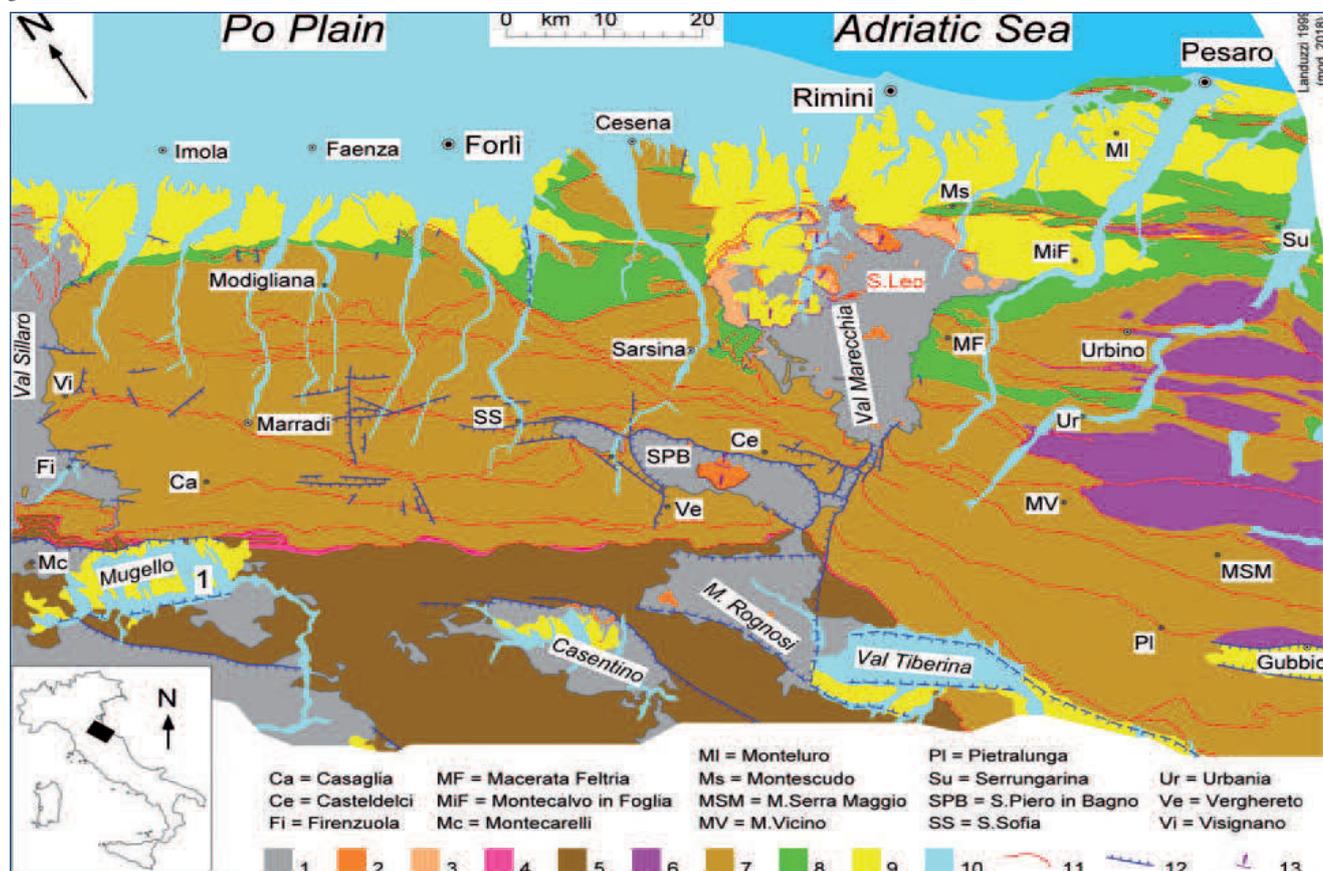
I confini geologici esposti in parete sono stati tracciati su mosaici di foto riprese da terra, con il supporto dei video da drone per inquadrare gli affioramenti da vari punti di vista. La realizzazione dei *line-drawing* è servita non solo a mostrare quei confini che non si possono rappresentare in carta, ma anche ad abbozzare la forma tridimensionale dei corpi geologici che compongono la Rupe. In questo articolo sono riportati i dieci migliori *line-drawing* prodotti, gli stessi che corredano la carta nella sua versione originale in scala 1/2000 (Figura 6, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 19, Figura 20).

2. INQUADRAMENTO REGIONALE

La Rupe di San Leo è un piccolo lembo di successione epiligure nel centro della Coltre della Val Marecchia, che è un grande Klippe della coltre ligure dell'Appennino settentrionale (Figura 2; cfr. Lucente et al., 2002).

Figura 2.

Carta geologica schematica dell'Appennino settentrionale esterno (da Barchi et al. 2001, modificato). 1: unità liguri ed epiliguri fino all'Aquitainiano. 2: unità epiliguri dal Burdigaliano al Langhiano. 3: unità epiliguri dal Serravalliano al Messiniano. 4: unità toscane d'avampaese. 5: unità toscane d'avanfossa. 6: unità umbro-marchigiane d'avampaese. 7: unità umbro-romagnole e marchigiane d'avanfossa, fino al Tortoniano. 8: unità romagnole e marchigiane d'avanfossa, dal Messiniano al Pliocene inferiore pre-coltre. 9: unità del Pliocene post-coltre - Pleistocene inferiore. 10: unità del Pleistocene superiore - Olocene. 11: sovraccorrimenti. 12: faglie distensive ad alto angolo. 13: esempi di faglie distensive a basso angolo, sviluppate per tettonica gravitativa nella coltre della Val Marecchia.



La coltre è avanzata da SW a NE durante la sedimentazione della successione d'avanfossa nei domini toscano, umbro-romagnolo e marchigiano-padano. Il fronte attuale della coltre si trova nel sottosuolo padano, circa 2 km a S del centro di Rimini. Nella Rupe di San Leo la successione epiligure (Figura 3) è rappresentata dalla F.ne di San Marino (Burdigaliano p.p.) e dal membro inferiore della F.ne del Monte Fumaiolo (Langhiano).

Un'estesissima lacuna stratigrafica separa la F.ne di San Marino dalle sottostanti unità liguri (F.ne delle Argille Varicolori, F.ne di Sillano, F.ne di Monte Morello). La F.ne di San Marino e la F.ne del Monte Fumaiolo derivano da una sedimentazione di piattaforma, inizialmente carbonatica, poi ibrida e infine silicoclastica, che ha ricoperto la coltre mentre quest'ultima si stava accavallando sulle unità toscane (Ruggieri, 1958; Ricci Lucchi, 1964; Ricci Lucchi, 1986; Ricci Lucchi e Ori, 1985). Con la susseguente avanzata della coltre sulle unità umbro-romagnole e marchigiano-padane la piattaforma epiligure è stata smembrata, a tal punto che oggi i suoi resti sono sparsi dal Casentino al margine appenninico padano (Figura 2). Fin dalla metà del secolo scorso lo smembramento della piattaforma epiligure è stato messo in relazione con un'avanzata gravitativa della coltre della Val Marecchia, interpretata da Ruggieri

(1958) come un'enorme colata (cfr. Figura 4, A). Tuttavia, vari studi condotti negli anni '70 e '80 (v. sintesi in De Feyter, 1991) hanno mostrato come un colamento generalizzato delle unità liguri non fosse compatibile con l'assetto strutturale delle stesse. Sono stati quindi elaborati vari modelli di avanzata per scorrimento (Figura 4, B-F), differenti tra loro per la maggiore o minore importanza data alla tettonica gravitativa nei confronti di quella compressiva.

Il modello recentemente adottato nell'ambito del progetto CARG (Cornamusini et al., 2015) è una versione evoluta del modello di De Feyter (1991, Figura 4, F), che spiega la messa in posto della coltre con l'accumulo gravitativo di una sequenza di corpi alloctoni in un bacino subsidente. I sovrascorrimenti tra un corpo e l'altro sono del tipo alloctono su alloctono, mentre nella zona frontale della coltre l'alloctono si accavalla anche su semialloctono e neoautoctono. Secondo gli scriventi, gli Autori del progetto CARG non hanno fornito prove sufficienti per mettere in relazione i sovrascorrimenti alloctono su alloctono (non databili) con l'avanzata della coltre. Senza considerare questi sovrascorrimenti, l'avanzata della coltre appare più unitaria e si può scegliere un modello differente. Secondo gli scriventi, il modello di scivolamento gravitativo proposto da De Jager (1979; Figura 4, B) è quello che spiega meglio lo smembramento della piattaforma epiligure, con lo sviluppo di un sistema embriacato di faglie distensive contenuto nella coltre e scollato al contatto tra coltre e successione d'avanfossa. La faglia distensiva alla base della Rupe di San Leo (Figura 5) s'inquadra perfettamente in questo modello, e faglie analoghe si trovano alla base di molte altre rupi nella Val Marecchia (Figura 2). Oltre a una "zona di distacco" in estensione, il modello di De Jager prevede una "zona d'accumulo" in compressione, che in teoria dovrebbe corrispondere alla zona frontale della coltre. Nel modello la zona d'accumulo è caratterizzata da un sistema embriacato di sovrascorrimenti, associati alle faglie distensive della zona di distacco in un contesto comune di propagazione retrogressiva. In Val Marecchia, invece, i pochi sovrascorrimenti affioranti e databili sono più recenti delle faglie distensive: l'alloctono si è infatti accavallato su semialloctono e neoautoctono non prima del Pliocene inferiore "post-coltre", cioè quando la coltre aveva già raggiunto la sua posizione attuale e la successione epiligure era già stata smembrata. L'unica faglia distensiva che può essere associata per età ai sovrascorrimenti affioranti è quella di Peticara - Maioletto (cfr. Cornamusini et al. 2015, pagg. 54-55), forse raccordabile con quella di San Leo (Figura 2). Le faglie distensive più antiche, come quelle di Torriana, Verucchio e San Marino (Figura 2) potevano invece essere associate a sovrascorrimenti oggi sepolti dalla successione plio-quadernaria del margine appenninico padano (cfr. Capozzi et al., 1987; cfr. Martelli et al. 2005, sez. A-A').

Figura 3.

Schema tettonico-stratigrafico semplificato della Val Marecchia (da De Feyter, 1991, modificato). La Rupe di San Leo è un piccolo lembo della successione epiligure.

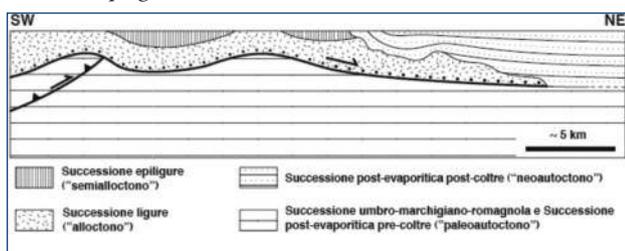
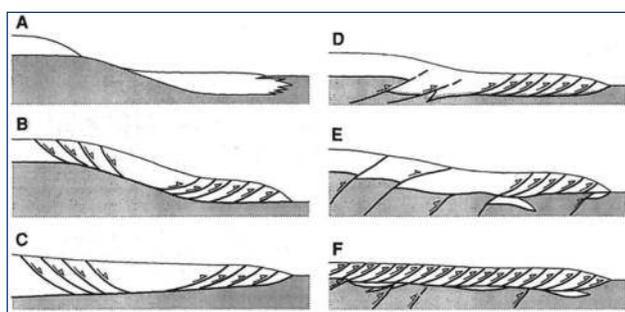


Figura 4.

Modelli d'avanzata dell'alloctono (da De Feyter, 1991):

- A: impilamento di olistostromi; B: scivolamento gravitativo (De Jager, 1979); C: espansione gravitativa (Elliott, 1976);
- D: tettonica compressiva e scivolamento gravitativo (Ricci Lucchi & Ori, 1985); E: tettonica compressiva (Castellarin & Pini, 1987).
- F: scivolamento essenzialmente gravitativo (De Feyter, 1991).



3. STRATIGRAFIA

Lo schema tettono-stratigrafico proposto in questo articolo (Figura 5) rappresenta in modo stilizzato la Rupe di San Leo, un lembo di successione semi-alloctona epiligure che poggia su unità alloctone liguri. Dai rilievi situati a N della Rupe si vedono in panoramica tutte le unità di questo schema (Figura 6).

Unità liguri

La F.ne delle Argille Varicolori (AVR, Aptiano – Ypresiano p.p.) è l'unità più bassa della successione rappresentata in carta. In Cornamusini et al. (2009) l'unità viene così descritta: "argilliti policrome, variabili da un colore rosso a verde a grigio scuro. Alle argilliti policrome si intercalano livelli discontinui di calcareniti, calcilutiti grigie o verdastre, areniti fini brune, siltiti di colore marrone scuro-rossastro e marne grigio-avana". La F.ne di Sillano (SIL, Cenomaniano p.p. – Ypresiano p.p.) non è stata differenziata in carta: affiora soprattutto a E della Rupe. La F.ne di M. Morello (MLL, Ypresiano p.p. – Luteziano) non è stata differenziata in carta: affiora presso lo spigolo SE della Rupe.

Figura 5.

Schema tettono-stratigrafico non in scala della Rupe di San Leo. Nella parte meridionale della Rupe una faglia distensiva a basso angolo, di origine gravitativa, ha accostato la successione epiligure alle unità liguri. La base stratigrafica della successione epiligure si vede solo nel tetto della faglia, cioè nella parte settentrionale della Rupe. La successione completa è composta dalla F.ne di San Marino (membri SMN1-2 e SMN3) e dalla F.ne del Monte Fumaiolo (membro MFU1).

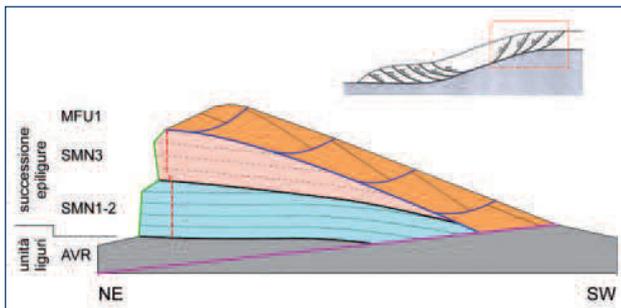


Figura 6.

Panoramica della Rupe di San Leo da NNW (foto Belli 1920-1930). La foto, precedente ai crolli del 2006 e del 2014, mostra l'intera successione epiligure: in parete affiorano un SMN1 sottile e discontinuo, un potente SMN2 e un SMN3 di spessore molto variabile; i pendii sommitali della rupe sono modellati nell'erosibile MFU1.



A San Leo tra unità liguri e successione epiligure si riscontra un contatto stratigrafico verticale, discontinuo e discordante, caratterizzato da una lacuna stratigrafica che comprende tutte le unità epiliguri dal Bartoniano al Burdigaliano p.p. Tuttavia, questo tipo di contatto affiora solo alla base delle pareti NNE e NNW della Rupe (Figura 6, Figura 7). Alla base delle altre pareti il contatto è invece tettonico.

Successione epiligure

A San Leo la F.ne di San Marino (SMN, Burdigaliano p.p.) è composta da tre membri (SMN1, SMN2 e SMN3) come nelle aree limitrofe, ma presenta alcune differenze rispetto alle successioni descritte dalla cartografia del progetto CARG. In carta sono state riportate solo due unità: quella inferiore corrisponde a SMN1+SMN2, mentre quella superiore corrisponde a SMN3.

Il membro SMN1, non differenziato in carta per ragioni di scala, affiora solo alla base delle pareti NNE e NNW della Rupe, ed è costituito da un singolo livello di calciruditi con sporadici clasti derivati dalle unità liguri (Figura 7). Questo livello è correlabile per facies e composizione con il membro SMN1 di M. San Severino, Tausano e San Marino, sebbene

Figura 7.

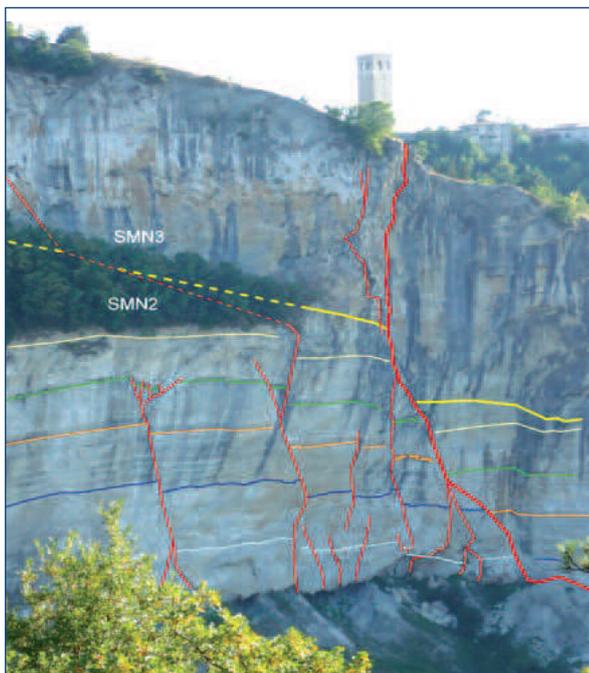
Contatto stratigrafico tra AVR (sotto copertura vegetale) e SMN1. Il membro SMN1 è spesso pochi metri ed è costituito da biocalciruditi con frammenti di roccia derivati dalle unità liguri.



Figura 8.
Parete NNE prima del crollo 2014 (foto Guerra 2011). Il membro SMN2 è stratificato a banchi, mentre la stratificazione del membro SMN3 non si vede da lontano. Il contatto SMN2 – SMN3 è discordante. L'intera successione affiorante è dislocata da una gradinata di faglie distensive immergenti a WSW.



Figura 9.
Dettaglio della parete NNE prima del crollo del 2014 (foto Guerra 2011). I banchi e gli strati spessi del membro SMN2 presentano una discreta continuità laterale. Il contatto discordante tra SMN2 e SMN3 ha un'ambigua evidenza morfologica: bordo interno di una cengia nella parete alterata, bordo inferiore di un aggetto nella parete fresca.



il suo spessore sia molto ridotto (circa 3 m a San Leo contro i 50 m di San Marino). Livelli simili a quello di San Leo s'intercalano anche nel membro SMN 2 della successione di Monte Fumaiolo, ma la loro continuità laterale non sembra tale da consentire una correlazione fino a San Leo. In Cornamusini et al. 2009 il membro SMN1 viene così descritto: "biocalcareni ruditiche, calciruditi e ruditi polimictiche, a stratificazione spesso indistinta e dall'aspetto massivo. Il colore è biancastro, variabile dal grigio a grigio-verdastro. Frequente la bioturbazione dei sedimenti ed abbondante il contenuto macrofossilifero".

Il membro SMN2 della Rupe è costituito da biocalcareni in banchi di color grigio chiaro, da piano-paralleli nella parete NNE (Figura 8, Figura 9, Figura 10) a variamente inclinati nella parete NNW (Figura 12). I banchi sono separati da strati arenitici leggermente più scuri, con un'alta frequenza di microfrazture sub-perpendicolari alla stratificazione. Le biocalcareni dei banchi sono molto omogenee, ma dal punto di vista meccanico sono anisotrope: molti blocchi franati presentano infatti una marcata fissilità per laminazione. In alcuni blocchi franati e in alcuni banchi della parete NNE è visibile una stratificazione incrociata di ordine inferiore, ma il rilevamento a distanza non consente di attribuire a questo dato un valore sistematico.

Nella Rupe lo spessore delle biocalcareni in banchi è massimo presso lo spigolo NE (circa 100 m, Figura 6), e minimo

Figura 10.
Parete NNE. Dopo il crollo del 2014 il contatto discordante tra SMN2 e SMN3 ha assunto un'evidenza morfologica univoca, come bordo inferiore di un aggetto. Sopra al contatto la scarpata principale del crollo è stata determinata da una grande frattura pre-esistente, mentre sotto il contatto la stessa scarpata è stata determinata da fratture di neoformazione in roccia fresca. Gli ammassi crollati sono stati svincolati lateralmente da faglie pre-esistenti.



presso lo spigolo NW (circa 40 m, Figura 6). Annullando alcune dislocazioni tettoniche sicuramente post-sedimentarie, è possibile ipotizzare che la successione dello spigolo NW della Rupe di San Leo fosse originariamente contigua a quella di M. San Severino (oggi distante 1,2 Km in direzione NE), nella quale le biocalcareni a banchi non esistono.

Figura 11.

Dettaglio della parete NNE dopo il crollo del 2014. Le linee colorate corrispondono alle discontinuità classificate da ENSER per la modellazione geomeccanica del crollo (Figura 21). Le linee nere evidenziano fratture di neoformazione beanti, particolarmente insidiose per la stabilità della parete E.



Figura 12.

Parete NNW dopo il crollo del 2006. La stratificazione a banchi del membro SMN2 non è piano-parallela, s'immerge mediamente verso ENE e mostra variazioni di spessore che non si notavano nella parete NNE. Il contatto tra SMN2 e SMN3 è visibilmente discordante. Continua la gradinata di faglie distensive immergenti a WSW già vista nella parete NNE. Il membro MFU1 non affiora, anche perché la sommità della rupe è attualmente coperta dal bosco.



Figura 13.

Spigolo NW. Si vede l'intera successione epiligriva della Rupe. MFU1 è in contatto discordante con SMN2 e SMN3, mentre SMN3 è in contatto discordante con SMN2. Il contatto tra SMN e MFU si è comportato come superficie di scollamento per un sistema embricato di faglie listriche distensive, di origine gravitativa.



Figura 14.

Parete W. Il limitare del bosco alla base della Rupe riflette l'andamento della faglia gravitativa basale, che taglia in rampa l'intera successione epiligriva. Alcune delle faglie gravitative scollate alla base di MFU1 terminano nella parte alta della stessa unità, rivelando una probabile crescita sin-sedimentaria.

della componente silicoclastica nelle areniti; – discordante, perché la superficie di contatto tronca i banchi del membro SMN2 nello spigolo NW (Figura 13, Figura 14), nella parete NNW (Figura 12) e nel settore E della parete NNE della Rupe (Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11).

Il membro SMN3 della Rupe è costituito da calcareniti ibride in strati da sottili a spessi, a volte oblitterati da un'intensa bioturbazione. In SMN3 numerosi corpi sedimentari di spessore da metrico a decametrico si sono sovrapposti e/o giustapposti determinando una stratificazione incrociata a grande scala, facilmente rilevabile anche a distanza (Figura 15).

Nella Rupe lo spessore di SMN3 presenta un massimo assoluto di circa 100 m presso lo spigolo SE, un minimo relativo di circa 30 m nella parete NNW, un massimo relativo

Figura 15.

Il membro SMN3 ha una stratificazione sottile e incrociata, con clinoforni di grande ampiezza.



Figura 16.

Ai piedi della parete S, presso la porta del paese, affiora il contatto stratigrafico discordante tra SMN3 e MFU1. Il tetto di SMN3 è irregolare e presenta "tasche" d'origine ignota. La base di MFU1, nonostante si sia comportata come livello di scollamento per le sovrastanti faglie gravitative, non coincide con un livello di persistente debolezza meccanica. MFU1 inizia infatti con uno spessore da centimetrico a decimetrico d'arenaria omogenea. L'unico modo di spiegare l'avvenuto scollamento sembra essere la liquefazione (cosismica?) dello strato sabbioso basale di una successione solo in parte consolidata. Questa spiegazione trova conforto nella configurazione in crescita delle faglie più esterne del sistema embriacato (Figura 13, Figura 14, Figura 19).



di circa 60 m presso lo spigolo SW e un minimo assoluto di 0 m nella parete W, dove la F.ne di Monte Fumaiolo poggia in discordanza su SMN2 (Figura 6, Figura 13, Figura 14). A scala regionale il membro SMN3 ha una notevole continuità laterale, che lo rende facilmente correlabile tra le successioni del Monte Fumaiolo, di San Leo, di Tausano e di San Marino. In Cornamusini et al. 2009 il membro SMN2 viene così descritto: "biocalcareni di colore grigio-verdastro, con una discreta componente di clasti non carbonatici (tra cui diffusa la glauconite cloritizzata). Questi sedimenti sono organizzati in strati medi e spessi, con laminazione incrociata a basso angolo. Tra gli elementi carbonatici delle calcareniti prevalgono i frammenti di fossili. Il progressivo aumento della frazione non carbonatica e prevalentemente glauconitica segna il passaggio alla soprastante Formazione di Monte Fumaiolo."

A San Leo il contatto stratigrafico tra la F.ne di San Marino e la F.ne di Monte Fumaiolo è: – verticale, perché non ci sono evidenze d'eteropia tra le due Formazioni; – discontinuo perché è netto, con "tasche" d'origine ignota a tetto di SMN3 (Figura 16), ed è contrassegnato da un drammatico aumento della frazione silicoclastica nelle areniti; inoltre, nel cortile interno della Rocca di San Leo un sondaggio ha incontrato poco sotto a questo contatto due livelli decimetrici ricchissimi di glauconite, che si sono formati in condizioni di sedimentazione condensata; – discordante, perché nella parete W della Rupe la F.ne di Monte Fumaiolo poggia sia su SMN2, sia su SMN3 (Figura 13, Figura 14); nella stessa parete, l'angolo apparente tra il contatto SMN2/SMN3 e la base della F.ne di Monte Fumaiolo

Figura 17.

Laminazione incrociata all'interno di un banco arenaceo del membro MFU1.



è di circa 10°; alla scala dell'intera Rupe, le variazioni di spessore descritte per il membro SMN2 fanno pensare che la forma primitiva del contatto tra la F.ne di San Marino e la F.ne di Monte Fumaiolo fosse ondulata.

F.ne del Monte Fumaiolo (MFU, Langhiano – Serravalliano p.p.): a San Leo affiora solo il primo membro (MFU1) dei due individuati nell'area tipo, mentre nelle successioni di M. San Severino e di Tausano affiorano entrambi. In Cornamusini et al. 2009 il membro MFU1 viene così descritto: "banchi e strati amalgamati di arenarie miste/ibride e calcari arenacei a stratificazione piano-parallela, obliqua a basso angolo. Livelli di marne sabbiose bioturbate e fossilifere sono intercalate alle arenarie. La composizione delle arenarie è di tipo misto-ibrido, data da granuli carbonatici e silicoclastici, oltre ad abbondanti granuli di glauconite che conferiscono alla roccia un colore grigio-verdastro. Le arenarie sono caratterizzate anch'esse da frequente bioturbazione e da strutture quali laminazione piano-parallela ed incrociata". Questa descrizione vale anche per San Leo (Figura 17), con la precisazione che i calcari arenacei (*alias* calcareniti ibride) sono rappresentati da livelli sporadici, presenti solo nella parte bassa dell'unità.

4. TETTONICA

Strutture sin-sedimentarie (Langhiano)

Nella Rupe di San Leo, il membro MFU1 della F.ne di Monte Fumaiolo è interessato da un sistema embricato di faglie distensive, controllato da una superficie di scollamento principale situata alla base della Formazione stessa. In affioramento, la superficie di scollamento appare geometricamente confinata in uno spessore decimetrico d'arenaria omogenea e priva di strutture (Figura 16). In assenza di strati argillosi o altri livelli di persistente debolezza meccanica, si può pensare che lo scollamento si sia verificato poco dopo la sedimentazione, per liquefazione di sabbia allo stato sciolto. Quest'ipotesi trova riscontro nel comportamento fragile-dut-

tile che MFU1 ha manifestato durante la deformazione (angoli di rampa da 20° a 60°), e nella configurazione in crescita delle faglie più esterne del sistema (parete W, Figura 14). L'origine di queste faglie è gravitativa, ed è probabile che l'intero sistema facesse parte della testata di un grande *slump*. La direzione media delle faglie è SSE-NNW. L'immersione e l'inclinazione delle faglie variano in funzione delle rotazioni che le stesse hanno subito, in almeno due fasi successive. La prima fase è sin-sedimentaria e dipende dall'effetto "domino" generato dal movimento delle faglie (Figura 18), mentre la seconda fase è post-sedimentaria. L'effetto cumulativo di queste rotazioni è stato un basculamento verso SW che ha ridotto l'inclinazione delle faglie, in certi casi fino a invertirne l'immersione da ENE a WSW (Figura 13, Figura 14, Figura 19).

Strutture post-sedimentarie (Tortoniano – Pliocene inferiore)

La base della Rupe di San Leo coincide col contatto tra le unità liguri e la successione epiligure, che è stratigrafico solo alla base delle pareti NNE e NNW (Figura 1, Figura 6, Figura 8, Figura 12), mentre è tettonico alla base di tutte le altre pareti. Dove non è stato dislocato da faglie successive, il contatto tettonico si presenta come una rampa immergente verso NE, che ribassa verso NE l'intera successione epiligure e parte delle sottostanti unità liguri (Figura 5, linea magenta). Presso lo spigolo SW della Rupe (Figura 14), l'angolo tra la rampa e la stratificazione di MFU è di circa 25°; presso l'ingresso del paese (Figura 19), l'angolo tra la rampa e il contatto stratigrafico SMN/MFU è di circa 28°; presso lo spigolo NW della Rupe (Figura 13), l'angolo tra la rampa e il contatto stratigrafico SMN2/SMN3 è di circa 30°. La rampa è facilmente interpretabile come parte di una faglia distensiva listrica, probabilmente scollata alla base della coltre della Val Marecchia e riconducibile alla messa in posto gravitativa della coltre stessa. Lo scorrimento rotazionale su questa faglia listrica ha provocato il basculamento verso SW dell'intera successione epiligure. L'attuale inclinazione degli strati meno disturbati di MFU (spigolo SW, Figura 14) fa pensare che la successione sia stata ruotata di circa 20°.

Strutture post-sedimentarie (Pliocene superiore – Attuale)

Tutte le faglie descritte in questo paragrafo hanno dislocato il contatto tra le unità liguri e la successione epiligure dopo lo scorrimento rotazionale descritto nel paragrafo precedente. Osservando la Rupe da N, si percepisce una regolare gradinata di faglie distensive ribassanti a WSW (Figura 6). La direzione prevalente di queste faglie

Figura 18.

Rotazione di faglie distensive per "effetto domino".



Figura 19.

Dallo spigolo di SW della Rupe alla porta del paese, la base della parete S coincide col contatto tettonico tra unità liguri e MFU1. In parete l'insieme embricato di faglie gravitative scollate alla base di MFU1 assume la massima evidenza (dettaglio a). Dalla porta del paese allo spigolo SE ricompare il membro SMN3, ma il contatto tra quest'ultimo e MFU1 è parzialmente mascherato da una faglia trascorrente destra (dettaglio b).



è NNW-SSE e l'inclinazione è di circa 70°. Nelle faglie più importanti i rigetti sono pluri-decametrici. La geometria di queste faglie non è perfettamente planare, perché probabilmente è stata determinata dall'attivazione in *shear* di discontinuità pre-esistenti non del tutto parallele tra di loro. Tra le faglie della gradinata, la meglio documentata è quella che determina la forma in pianta della parete E (Figura 1, Figura 20), mascherando il contatto tettonico tra unità liguri e successione epiligure.

La direzione di questa faglia è controllata da due famiglie di discontinuità (Figura 21): la parte centro-settentrionale della faglia deriva dalla famiglia K1, mentre la parte meridionale deriva dalla famiglia K2. In parete, specchi di faglia con strie evidenti a distanza (Figura 20) permettono di attribuire a K1 uno scorrimento trans-tensivo sinistro, con prevalenza della componente distensiva. Nelle faglie principali che attraversano la parete NNE (Figura 10),

altre strie evidenti a distanza suggeriscono invece uno scorrimento quasi puramente distensivo.

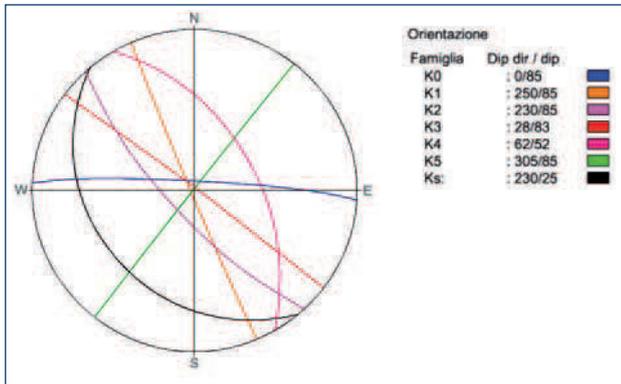
Le rare faglie con direzione E-W, derivate dall'attivazione in *shear* della famiglia K0, sono particolarmente interessanti per il loro scorrimento trascorrente destro. La più evidente e documentata di queste faglie è quella che corre dallo spigolo SE della Rupe fin quasi alla porta d'ingresso del paese, affiancando la parte alta della F.ne di San Marino (lembo S) alla parte bassa della F.ne di Monte Fumaiolo (lembo N). Nel tempo, con l'erosione, l'unità affiorante nel lembo S è stata ridotta a un esile diaframma, una specie di "paravento" calcareo che nasconde la parte bassa della F.ne di monte Fumaiolo (Figura 19, Figura 22). Al momento i rapporti cronologici tra faglie distensive e faglie trascorrenti non sono noti, anche se la presenza di faglie trans-tensive sembra suggerire una relativa contemporaneità dei due tipi di scorrimento.



Figura 20.

Parete E. Il membro SMN2 è stratificato in banchi piano-paralleli, mentre il membro SMN3 ha una stratificazione sottile e incrociata. La faglia gravitativa basale mette entrambi i membri in contatto con le unità liguri. In parete è esposto lo specchio di una faglia trans-tensiva sinistra, che disloca la faglia gravitativa basale ribassando la successione epiligure (WSW) rispetto alle unità liguri (ENE). Le linee e le superfici colorate corrispondono alle discontinuità classificate da ENSER (Figura 21).

Figura 21.
Classificazione delle discontinuità prodotta da ENSER (Lucente, 2014).



5. GEOMORFOLOGIA

La determinazione dei contatti da riportare nella carta geologica è stata in parte favorita da criteri basati sulla morfoselezione, perché le unità rappresentate sono diversamente erodibili. Il profilo N dello schema tettono-stratigrafico della Figura 5, ispirato alle pareti NNE e NNW della Rupe di San Leo, rappresenta in modo stilizzato queste differenze. Con un'erosione "normale" data da dilavamento, disaggregazione e piccoli crolli, si sviluppano una cengia al confine tra SMN2 e SMN3 e un aggetto in SMN3 (profilo verde), mentre con crolli importanti come quello del 2014 la cengia scompare e si crea un aggetto nella parte basale di SMN3 (profilo rosso). Entrambi i profili sono stati utili per localizzare a distanza il contatto tra SMN2 e SMN3. Più in alto nella successione, la morfoselezione è stata indispensabile per localizzare il contatto tra SMN3 e MFU1 in zone coperte da vegetazione: l'erodibilità delle arenarie (MFU1), decisamente maggiore di quella delle calcareniti ibride (SMN3) ha infatti condizionato lo sviluppo dei pendii dolci che caratterizzano la sommità della Rupe in corrispondenza dell'abitato e nelle aree boschive a N, W e S dello stesso.



Figura 22.
L'azione di questa faglia, combinata col modellamento erosivo del pendio, ha creato un "paravento" di SMN3 che nasconde per circa 60 m il contatto stratigrafico tra SMN3 e MFU1 (cf. Figura 19).

6. CONCLUSIONI

La carta in scala 1/2000 della Rupe di San Leo è un elaborato di estremo dettaglio, ricco di elementi geologici oggettivi che ne favoriscono l'uso in campo tecnico. Vista insieme ai *line-drawing* delle pareti rocciose, la carta lascia intuire il modello tridimensionale della Rupe che gli scrittori intendono realizzare nel prossimo futuro. Dall'interpretazione dei dati rilevati sono stati ricavati caratteri stratigrafici inediti e una ben definita cronologia di deformazione. L'elemento tettonico più interessante è la grande faglia distensiva a basso angolo, di origine gravitativa, che affiora ai piedi della rupe nelle pareti W, S ed E. È probabile che questa faglia rappresenti il settore orientale della faglia Perticara – Maioletto (Cornamusini et al. 2015). Rilevando in dettaglio e datando le molte faglie analoghe a quella di San Leo (Figura 2) si potranno ottenere nuove, sostanziali informazioni sulla cinematica della Coltre della Val Marecchia.

BIBLIOGRAFIA

- BADIOLI L. (2012). Studio Geologico e strutturale della Rupe di San Leo. Tesi di laurea biennale – relatore G.A. Pini, corelatore C.C. Lucente. Corso di laurea in Scienze Geologiche - Università degli studi di Bologna, a.a. 2011-2012.
- BARCHI M., LANDUZZI A., PIALLI G., MINELLI G. (2001). Outer Northern Apennines. In: G.B. Vai and I.P. Martini (eds.), *Anatomy of an Orogen: The Apennines and Adjacent Mediterranean Basins*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2001, 215-254.
- CAPOZZI R.; LANDUZZI A.; ZANOLI S. (1997). Neogene evolution of the Apennine foothill structures from Northern Marche to Eastern Romagna. *Mem. Soc. Geol. It.*, 52, 631-646.
- CASTELLARIN A. & PINI G.A. (1987) - L'arco del Sillaro: la messa in posto delle argille scagliose al margine appenninico padano (Appennino Bolognese). In: R. GELMINI (ed.): *La geologia del versante padano dell'Appennino Settentrionale*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 39, 127-141.
- CORNAMUSINI G., CONTI P., BONCIANI P., CALLEGARI I., CARMIGNANI L., MARTELLI L., QUAGLIERE S. (2009). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 267 – SAN MARINO, APAT, Serv. Geol. It., 1-125 pp.
- CORNAMUSINI G., MARTELLI L., CONTI P., PIERUCCINI P., BENINI A., BONCIANI F., CALLEGARI I., CARMIGNANI L. (2015). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 266 – MERCATO SARACENO, ISPRA, Serv. Geol. It., 1-124.
- DE FEYTER A.J. (1991). Gravity tectonics and sedimentation of the Montefeltro, Italy. *Geol. Ultraiect.*, 35, 1-168.
- DE JAGER J.(1979) The relation between tectonics and sedimentation along the "Sillaro line" (Northern Apennines, Italy), *Geologica Ultraiectina*, 19, 1-98.
- ELLIOTT, D. (1976). The motion of thrust sheets. *Journal of Geophysical Research*, 81, 949-963.
- LUCENTE C.C. (2014). Il crollo del versante nord della rupe di San Leo del 27 Febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza. *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 52, 6-22.
- 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.
- MARTELLI L., CIBIN U., CORREGGIARI A., QUAGLIERE S., ROVERI M., SEVERI P. (2005). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 256 – RIMINI, APAT, Serv. Geol. It., 1-94.
- RICCI LUCCHI F. (1964) - Ricerche sedimentologiche sui lembi alloctoni della Val Marecchia (Miocene inferiore e medio). *Giorn. Geol.*, (2) 32: 545-650.
- 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., Homewood P. & Williams G. Eds., *Excursion Guidebook, Foreland Basin Symp.*. Fribourg, 137-176.
- RUGGIERI G. (1958). Gli esotici neogenici della colata gravitativa della Val Marecchia (Appennino Romagnolo). *Atti Acc. Sc. Lett. e Arti Palermo*, 177-163.

GEOMETRIA E STRUTTURE DELLA RUPE DI SAN LEO ATTRAVERSO L'INVESTIGAZIONE CON SISMICA A RIFLESSIONE, PRIMI RISULTATI

A.E. BRACCI*¹, C.C. LUCENTE**², G. MAINARDI*²,
D. PERACCINI*³, L. BORGATTI***³, A. LANDUZZI***³

*¹ Fisico presso Geoexploration

*² Ingegnere presso Geoexploration

*³ Geologo presso Geoexploration

** Geologo presso l'Agenzia regionale per la sicurezza del territorio e la protezione civile - Servizio Area Romagna

*** Geologo presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali DICAM - Università di Bologna

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito dello studio strutturale della placca di San Leo è stata sperimentata un'innovativa tecnica d'indagine geofisica di tipo sismico a riflessione ad alta risoluzione con sorgente *mini-vibroiseis* (Figura 1; Brouwer et. al., 1998; Druivenga et. al., 2011; Helbig, 1983; Krawczy et. al., 2013). Questa tecnica, introdotta recentemente in Italia dalla GeoExploration, presenta diversi vantaggi rispetto alle tecniche sismiche tradizionali grazie all'utilizzo della sorgente vibrazionale in onde di taglio (onde S) la quale consente una miglior caratterizzazione per quanto riguarda le geometrie e la consistenza del sottosuolo sfruttando la possibilità di generare onde sismiche con frequenze specifiche.

L'utilizzo delle onde sismiche di taglio in contesti come quello di San Leo presenta importanti vantaggi:

- sono in grado di intercettare bassi contrasti di rigidità tra le differenti unità e quindi discriminare con ottima risoluzione le velocità sismiche e le discontinuità associabili alle successioni litostratigrafiche e alle strutture tettoniche;
- dal momento che per definizione le onde sismiche di taglio non si trasmettono nei fluidi, sono scarsamente influenzate dalla condizione idrogeologica dell'ammasso roccioso;
- tipicamente presentano una risoluzione maggiore ed un'attenuazione minore rispetto alle onde longitudinali (Onde P).



Figura 1.
Vibroiseis ELViS III lungo lo stendimento sismico a riflessione L3.

Il sistema vibrazionale portatile in grado di generare in maniera controllata le onde sismiche può essere utilizzato in aree urbanizzate nelle quali, a differenza delle tecniche sismiche a rifrazione, con stendimenti relativamente brevi si possono raggiungere notevoli profondità d'indagine.

La sorgente sismica non è invasiva quindi non reca danni a sottoservizi e abitazioni, inoltre è meno soggetta agli effetti di disturbo dei rumori ambientali in quanto opera in un intervallo di frequenze sismiche definito e modulabile in base alle caratteristiche del sito di studio.

Infine la tecnica sismica a riflessione, a differenza di quella a rifrazione, permette l'individuazione delle inversioni di velocità sismica che possono essere presenti nel sottosuolo in contesti come quello di San Leo (una placca rocciosa calcareo-arenacea a contatto con le argilliti sottostanti).

2. IL METODO SISMICO A RIFLESSIONE

La tecnica sismica a riflessione è il metodo geofisico più largamente impiegato soprattutto nella ricerca di strutture geologiche e tettoniche, in particolare profonde.

La sua principale applicazione è nel campo dell'esplorazione petrolifera, nella quale i grandi mezzi che vengono dedicati a questo tipo d'indagine hanno consentito un miglioramento estremo delle tecniche tanto d'acquisizione che di elaborazione dei dati.

Essa determina con notevole dettaglio la profondità e la pendenza delle discontinuità geologiche; inoltre è l'unico metodo che permette di ottenere con la stessa precisione gli andamenti di stratificazioni sovrapposte, anche numerose ed a profondità molto diverse.

Tra gli anni '70 e '80 la sismica a riflessione applicata all'ingegneria, ad indagini ambientali ed all'idrogeologia, ha avuto un notevole incremento d'impiego; questo sia grazie all'avvento di sensori (geofoni) ad alta frequenza e dei sismografi digitali per rilievi ad elevata risoluzione, sia alla possibilità di utilizzare sorgenti d'energia sismica ad alta frequenza in alternativa agli esplosivi.

La tecnica di prospezione più comune presuppone il cosiddetto rilievo continuo: i livelli riflettenti vengono seguiti cioè in modo continuo lungo il profilo mediante stendimenti simmetrici (*split spread*) o asimmetrici (*end-on*) rispetto al punto di energizzazione. Il risultato di un profilo sismico dipende in gran parte dai parametri utilizzati nel corso dell'acquisizione dati, parametri che vengono scelti dopo aver realizzato alcune prove preliminari.

In via del tutto teorica, si può considerare il *maximum offset* (distanza tra il punto di energizzazione più lontano dallo stendimento e l'ultimo geofono dello stendimento stesso) all'incirca uguale alla profondità che si vuole raggiungere; il *minimum offset* (distanza fra il punto di energizzazione ed il geofono ad esso più vicino) dovrebbe essere il più piccolo possibile al fine di registrare anche i primi arrivi delle onde rifratte, indispensabili per le correzioni statiche, compatibilmente con l'esigenza di evitare sia la saturazione del segnale ai geofoni, sia la registrazione di disturbi che, in prossimità della sorgente, hanno un'ampiezza tale da occultare completamente gli eventi riflessi. Un altro elemento fondamentale è la scelta della distanza intergeofonica, che è funzione del *maximum offset*, del *minimum offset*, del numero di canali disponibili e della risoluzione richiesta.

Una riflessione si verifica sempre in presenza di altri segnali sismici o rumori ambientali che possono interferire con essa o addirittura oscurarla; da qui la necessità di migliorare il più possibile il rapporto Segnale/Disturbo con vari espedienti. Una delle tecniche più diffuse è quella di operare con la cosiddetta "copertura CDP" (*Common Depth Point*, Figura 2), ovvero riunire i dati provenienti dallo stesso punto della superficie riflettente. In seguito si dovranno apportare le dovute correzioni in tempi, misurate durante la determinazione della velocità media al di sopra del riflettore (percorsi diversi dell'onda riflessa legati a differenti distanze sorgente-geofono) e quindi sommare le tracce relative ai tragitti esaminati (*stacking*) rafforzando il segnale riflesso.

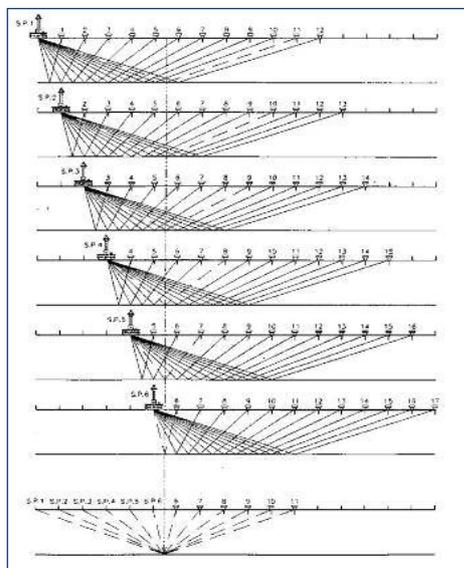


Figura 2.
Schema di registrazione dati con cannoncino sismico e CDP stacking.

Con tale metodo, registrando cioè più segnali riflessi da uno stesso punto riflettente (copertura multipla) che abbiano seguito percorsi diversi, è evidente che gli impulsi che giungono in fase (segnali) si sommano e quelli non in fase (disturbi vari) si attenuano (Bracci, 1985).

Le coperture multiple più usate vanno dal 1200% al 2400% ordine in funzione del dettaglio e del miglioramento del segnale che si vuole ottenere.

3. CENNI SULLA SORGENTE D'ENERGIA VIBROSEIS E CONFRONTO CON SISTEMI IMPULSIONALI

La metodologia sismica con sorgente *vibroiseis* è stata inventata da un gruppo di scienziati della Conoco (Continental Oil Company - USA) nel 1954. Con i *vibroiseis* è possibile ottenere dati a più alta risoluzione rispetto a sorgenti di tipo impulsionale (ad es. cannoncino sismico, esplosivo, massa battente) in quanto si possono realizzare in breve tempo e più ravvicinati fra di loro, molti punti d'energizzazione sismica sullo stendimento.

Obiettivi a poca profondità sono intercettabili con ottima risoluzione utilizzando alte frequenze sismiche, quindi la scelta della sorgente sismica che permetta d'inviare nel terreno segnali ad alta frequenza, risulta fondamentale.

Il terreno è essenzialmente un grande filtro in grado di nascondere informazioni. Per obiettivi profondi si utilizzano basse frequenze perché il terreno filtra superficialmente quelle alte, ma per rilievi a profondità di qualche centinaio di metri diviene molto interessante e importante l'impiego di segnali a medio-alta frequenza.

I piccoli vibratorii utilizzati in questo caso di studio non sono invasivi e possono essere impiegati su strade cittadine in quanto hanno poco ingombro e non recano danni ai sottoservizi interrati lungo le strade stesse.

L'impiego dei *vibroiseis* è tipicamente meno costoso rispetto a sorgenti di scoppio. Non c'è necessità di portare attrezzature di perforazione per la realizzazione dei fori, detonare piccole cariche di esplosivo o cartucce e poi ripristinare il terreno dopo gli scoppi.

Va sottolineato che il *vibroiseis* è una sorgente d'energia a frequenza controllabile mentre le sorgenti impulsionali offrono uno spettro completo di frequenze. Siccome il terreno assorbe molte frequenze, il procedimento d'acquisizione dipende quindi dalla tipologia dei terreni presenti nell'area di studio. La possibilità di disporre di un segnale di riferimento inviato nel terreno chiamato *sweep* e rilevato sulla piastra energizzante, tramite i *vibroiseis* si ha un notevole vantaggio in fase di elaborazione dei dati (procedimenti di deconvoluzione dei segnali) in quanto si può conoscere esattamente l'ampiezza e la frequenza dei segnali immessi nei terreni. È possibile quindi in tal modo, conoscere ed analizzare i segnali sismici specifici che si sono propagati nel sottosuolo.

Il problema che si ha utilizzando ad esempio la dinamite è che si fanno brillare le cariche senza conoscere l'ampiezza dei segnali durante lo scoppio, in quanto la funzione di trasferimento dell'energia nel terreno dipende dal tipo di terreno in cui avviene l'esplosione.

Una volta che si è scelta una densità dei punti d'energizzazione, eseguiti i fori e poste in sito le cariche di esplosivo, è complicato cambiare i parametri di scoppio (o ripetere delle registrazioni).

Con i *vibroiseis* invece si possono aggiungere, facilmente e a discrezione dell'operatore, punti d'energizzazione e variare l'escursione delle frequenze dei segnali sismici in modo da migliorare la qualità dei dati durante l'acquisizione dei sismogrammi.

È risaputo che se i dati sismici a riflessione sono stati registrati in maniera ottimale, la loro elaborazione e quindi l'interpretazione è decisamente agevolata e completata in tempi contenuti.

4. ACQUISIZIONE DATI SISMICI IN ONDE S CON VIBROSEIS A SAN LEO

Le operazioni di campagna sono iniziate col posizionamento dei geofoni sul terreno, il loro collegamento tramite morsetti bipolari ai cavi sismici e la connessione di questi ultimi al sismografo. In seguito è stata verificata la trasmissione del segnale di riferimento tra apparato sorgente e sismografi e la ricezione degli eventi sismici su tutti i geofoni. Infine, sono state realizzate alcune energizzazioni di prova al fine di scegliere le frequenze (*sweep*) da immettere nel terreno ed i parametri ottimali d'acquisizione sul sismometro.

Un esempio dello spettro di frequenza adottato (20-160 Hz) è riportato sotto in Figura 3.

Dopo aver effettuato la taratura della strumentazione, si è proceduto alla prospezione sismica a riflessione vera e

propria in modo tale che dopo ogni energizzazione (o somma di energizzazioni) su ciascun punto d'energizzazione prestabilito, si fosse acquisito e registrato il segnale sull'*hard-disk* del pc portatile collegato al sismografo per la successiva elaborazione dati.

Su ogni punto d'energizzazione vibratoria per generare le onde di taglio S sono state eseguite due energizzazioni: la prima con fase iniziale positiva e la seconda con fase iniziale negativa; successivamente durante l'elaborazione dati si è moltiplicata per -1 la seconda registrazione e la si è sommata alla prima per aumentarne l'ampiezza in fase dei segnali riflessi e diminuire il rumore ambientale.

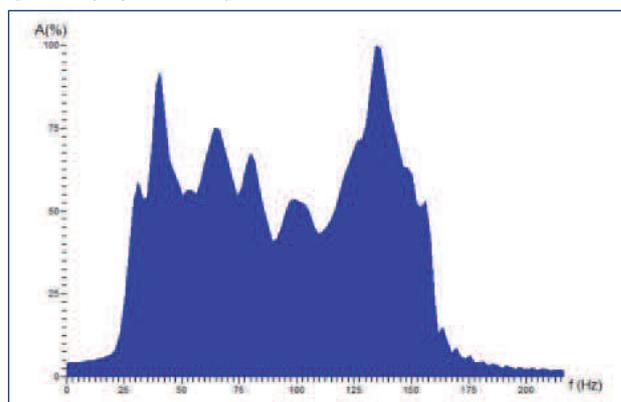
Nello specifico, oltre ad alcune linee sismiche a rifrazione non riportate in questo articolo, sono state realizzate con la tecnica sismica a riflessione con *vibroiseis* n.2 linee (Figura 4): la linea sismica L3 è stata realizzata con uno stendimento di 288 geofoni ad interdistanza di 1 metro per una lunghezza di 287 metri di rilievo mentre la linea sismica L4 è stata realizzata con uno stendimento di 72 geofoni sempre spazati 1 metro per una lunghezza di 71 metri di rilievo.

Come sorgente d'energia sismica è stato utilizzato il nostro sistema esclusivo *Vibroiseis ELVis III* generando le onde di taglio S fra i geofoni ad ogni due metri di progressiva metrica (es. fra i geofoni g1 e g2, poi fra i geofoni g3 e g4 e così via) sulla linea L3 e fra tutti i geofoni sulla linea L4.

Le energizzazioni, così realizzate, consentono di avere a disposizione una reale copertura ed una quantità di dati tale da coprire, con la giusta geometria dei raggi ed in maniera omogenea, le intere sezioni sismiche in tutti i settori e fino alle profondità adeguate senza lasciare tratti scoperti o disomogenei (schema in Figura 5).

Le sorgenti vibratorie utilizzate per questa prospezione sismica a riflessione, come accennato sopra, sono costituite da un generatore di onde di taglio S polarizzato nei due versi di immissione delle vibrazioni nel terreno (tipo destra e sinistra). Esse funzionano imprimendo quindi al terreno sollecitazioni di tipo orizzontale.

Figura 3.
Spettro di frequenza *sweep* 20-160 Hz.



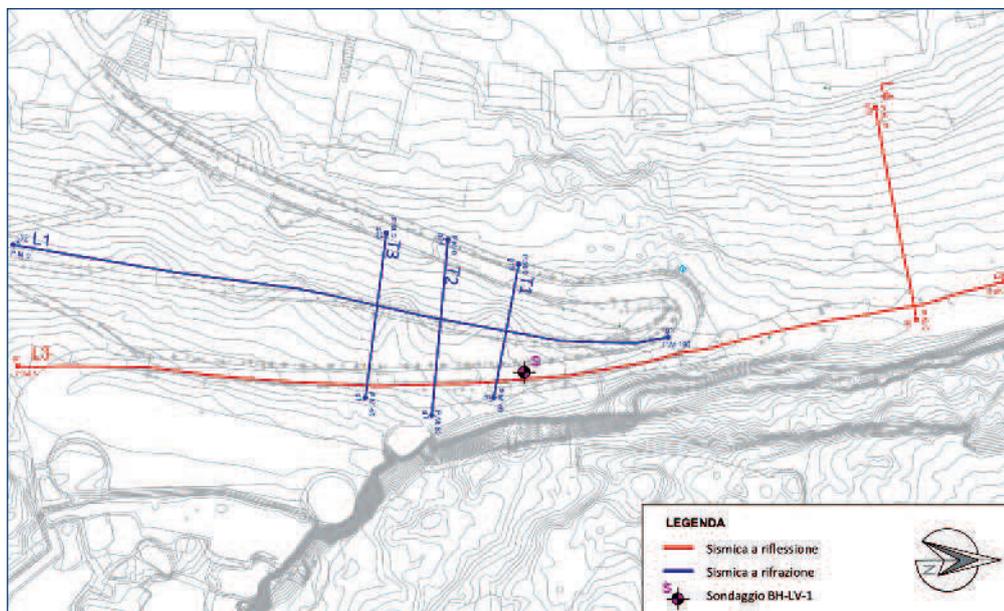


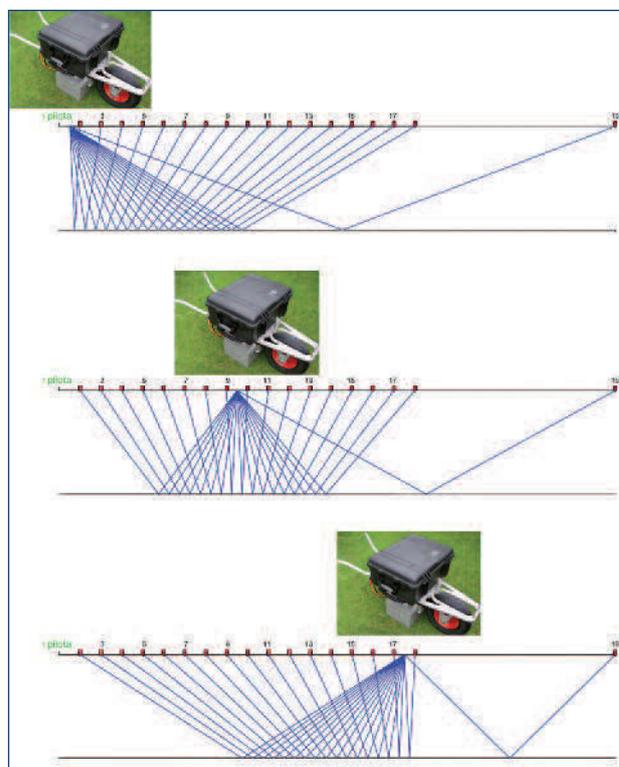
Figura 4.
Planimetria indagini sismiche.

Sulla linea L3 i dati sono stati registrati utilizzando n. 8 sismografi Geometrics Geode con 24 canali per unità e capacità di 64000 campioni per traccia, per complessivi 192 geofoni attivi su ogni sismogramma. Considerando che i punti di energizzazione sono stati effettuati ad ogni 2 metri fra i geofoni, si deduce che la copertura è stata del 4800%.

Sulla linea L4 i dati sono stati registrati utilizzando n. 3 sismografi Geometrics Geode con 24 canali per unità e capacità di 64000 campioni per traccia, per complessivi 72 geofoni attivi su ogni sismogramma. In questo caso i punti di energizzazione sono stati effettuati ad ogni metro fra i geofoni quindi la copertura è stata del 3600%. I parametri di acquisizione sono stati i seguenti:

Tempo di registrazione	11 secondi
Intervallo di campionamento	1 millisecondo
Filtri	esclusi
Stendimento	2D variabile rolling end-on, over ed end-off
Geofoni	Orizzontali 10Hz ad interdistanza 1 metro
Energizzatori	Vibroseis ELViS III e Wacker BS30, onde S
Tipo Sweep	20-160 Hz lineare, 10 secondi
Intervallo P.V. (Punti Vibrazione)	2 metri lungo L3 ed 1 metro lungo L4
Primo P.V.	-1 metro dal primo geofono
Ultimo P.V.	+1 metro dopo l'ultimo geofono
Stacks/P.V.	1 destra + 1 sinistra

Figura 5.
Esempio, schema di registrazione dati con vibroseis ELViS III con 192 geofoni.



5. ELABORAZIONE DATI SISMICI A RIFLESSIONE

Per l'elaborazione dei dati sismici a riflessione è necessario "traslare" tutti i punti di energizzazione e le posizioni dei geofoni su un piano di riferimento che generalmente è orizzontale (i.e. livello del mare nella ricerca petrolifera) e possibilmente posto alla base dei terreni alterati di superficie.

Il profilo del terreno delle linee L3 e L4 si può considerare uniformemente inclinato e come riferimento è stato utilizzato il piano campagna.

L'elaborazione dei dati sismici computerizzata, effettuata con impiego di software dedicato RadExPro Plus della DECO Geophysical Software Company (Russia), è stata articolata come elencato nei principali punti successivi:

- Correlazione dei sismogrammi;
- Inserimento delle geometrie;
- *Mute* chirurgico dei primi arrivi (*top mute*);
- Filtraggio in banda di frequenza (banda passante: 20/40-100/120 Hz);
- Analisi di velocità su CMP gathers;
- Applicazione di un guadagno di tipo AGC;
- Applicazione della correzione *normal move out, sorting* nel dominio CMP e *stack*;
- Bilanciamento ampiezze *post-stack* e filtraggio F-K.

Per motivi di spazio e complessità esplicativa, la descrizione dettagliata e finalità applicativa delle singole operazioni di elaborazione riportate sopra, si rimanda alla bibliografia disponibile su testi scientifici e riviste specializzate (Baker, 1999; Bracci, 1978; Hatton et. al., 1986; Yilmaz, 2001).

6. ESITO DELL'INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE

Le principali proprietà geomeccaniche riguardanti la resistenza, il grado di fratturazione e l'assetto strutturale dell'ammasso roccioso vengono desunte dallo studio delle velocità di propagazione delle onde sismiche (Boadu & Long, 1996) risultanti dall'effetto dell'immissione di una piccola sollecitazione meccanica nelle rocce mediante una sorgente vibratoria a frequenza variabile.

Una particolare attenzione va dedicata alle modalità esecutive per la determinazione dell'intervallo di frequenza (*sweep*) impiegato durante l'acquisizione dati (Bianchi & Meunier, 2012). A tale proposito, durante le prove preliminari condotte lungo gli stendimenti sono

state effettuate registrazioni con *sweeps* di frequenza variabile da 10 a 360 Hz.

Analizzando i segnali captati dai geofoni, è emerso che il range ottimale degli eventi riflessi sui sismogrammi mostrava un contenuto di frequenza compreso tra 20 e 160 Hz il quale è stato quindi impostato sul generatore di *sweep* della sorgente *vibroscis* per tutto il rilievo.

Le analisi delle velocità sismiche, eseguite lungo le linee durante l'elaborazione dei dati, hanno evidenziato che i principali livelli riflettenti sono riferibili ad interfacce di velocità non molto rilevanti essendo il substrato costituito sempre da roccia con caratteristiche geomeccaniche abbastanza simili.

In Figura 6 sono riportati i diagrammi riferiti alle progressive metriche della linea L3: 10, 70, 130, 190 e 275 (inizio della linea L4).

Sui diagrammi si può notare che l'escursione delle velocità cambia gradualmente dalla superficie scendendo in profondità, con variazione dei valori da 880 a 1550 m/s e su tutti si nota un'evidente inversione ai tempi A/R di millisecondi: 250, 210, 200, 230 e 220 alle pp.mm. riportate sopra, che è attribuibile al contatto fra la roccia e la formazione argillosa incassante della placca.

Alle pp.mm. 10 e 275 (inizio e fine linea L3), in prossimità rispettivamente dei tempi A/R di millisecondi 220 e 120, si assiste ad un'altra inversione di velocità meno significativa che è riconducibile ad una maggior fratturazione locale della roccia.

Il tracciamento delle discontinuità principali è stato eseguito sugli *stacks* (sismo-sezioni) distanze/tempi con riferimento ai livelli riflettenti identificati dalle variazioni di velocità riportate sui grafici delle analisi esaminati sopra (Figura 7).

I grafici di tali velocità di propagazione delle onde sismiche sono stati utilizzati per la ricostruzione delle sismo-sezioni con tracciamento lungo le fasi dei relativi riflettori posti sulle discontinuità e quindi per la conversione dei tracciamenti in profondità (Figura 8).

Infine, i livelli riflettenti degli *stacks* distanza-profondità

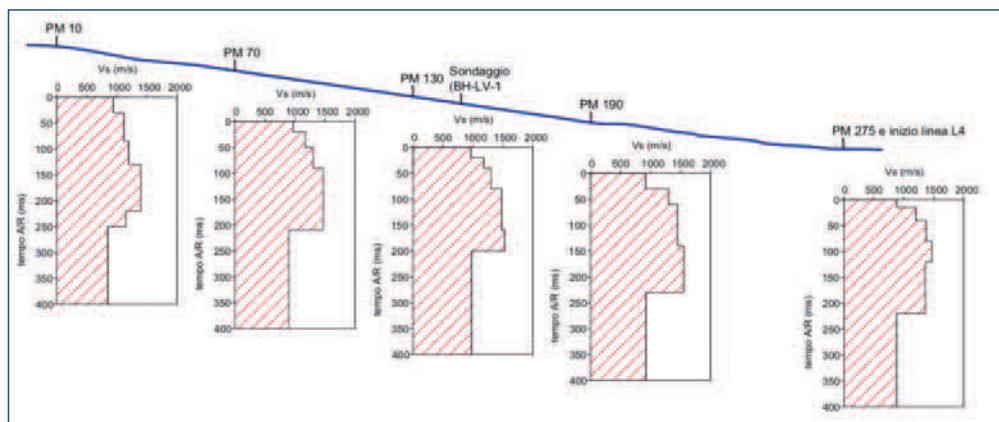


Figura 6.
Diagrammi delle analisi di velocità effettuati a diverse progressive metriche.

sono stati riportati sotto il profilo di campagna per ottenere le sezioni sismo-stratigrafiche riportate in Figura 9, sulle quali sono stati contraddistinti a colori i livelli caratterizzati da analoghe velocità sismiche di taglio. Lungo la sezione L4 è stato praticato un "forzato adattamento angolare" in verticale sotto il profilo di campagna molto acclive, degli eventi riflessi per cui le profondità dei riflettori non sono da considerare assolute ma con approssimazione del 10-15%.

L'aspetto interpretativo consiste nell'attribuzione di massima dei patterns di riflessione e sistemi di faglie a specifiche individualità geologico-strutturali dell'area di studio con riferimento all'esito dei carotaggi meccanici ed integrazione con informazioni geologiche dettagliate locali. Le sezioni sismo-stratigrafiche relative all'ammasso roccioso

investigato indicano in generale un trend di aumento dei valori delle velocità sismiche di taglio (maggiore consistenza della roccia) con l'aumentare della profondità. Gli elaborati mostrano anche un'alta quantità di allineamenti di fratturazione/fagliazione verticale con gradienti a volte significativi (linee continue sui disegni) ma sempre contraddistinte da rigetti contenuti (Ranucci e Monti, 1964). Nella prima metà della sezione L3 i suddetti livelli sono molto numerosi e nei primi 100 metri della sezione anche il tracciamento delle discontinuità riflettenti è stato piuttosto impegnativo con probabili allineamenti non sempre precisi ma corrispondenti comunque ad una situazione tettonica verosimilmente complessa. Analizzando i dati si può affermare di aver ottenuto, tramite le onde di taglio, un ottimo risultato con informazioni de-

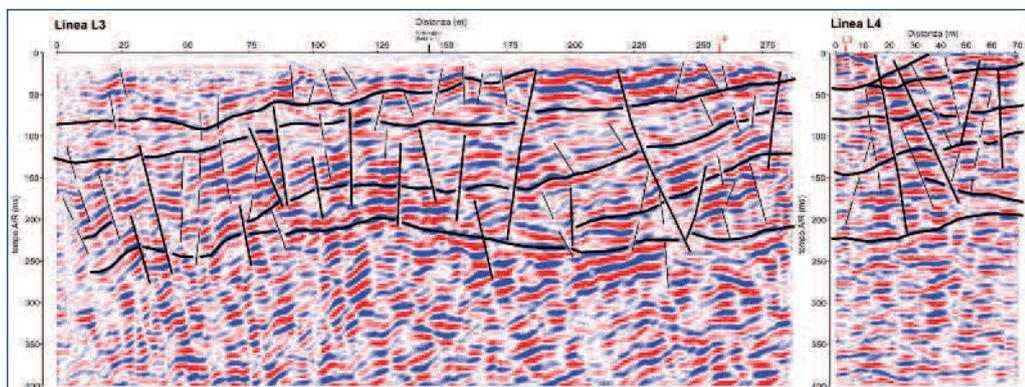


Figura 7. Stacks distanze/tempi con tracciamento dei riflettori maggiormente significativi.

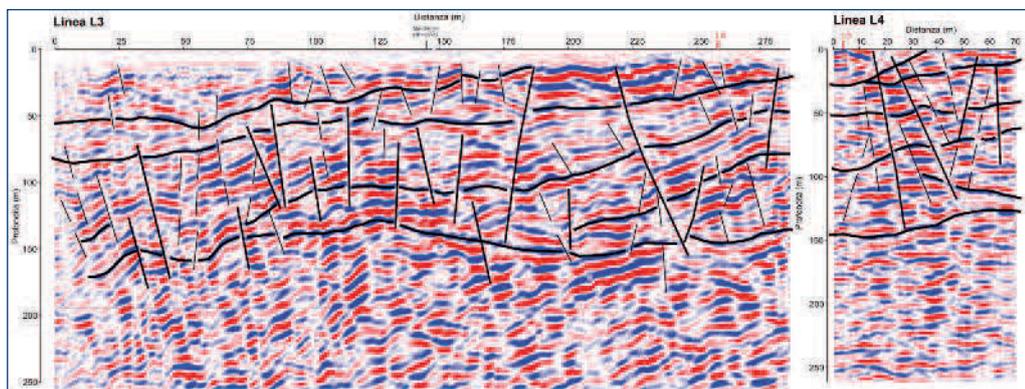


Figura 8. Stacks distanze/profondità con tracciamento dei riflettori maggiormente significativi.

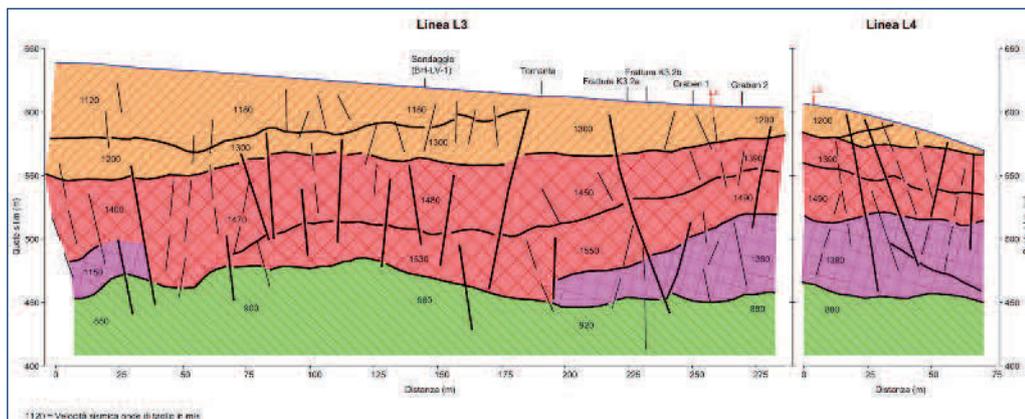


Figura 9. Sismo-sezioni finali delle linee sismiche L3 e L4.

cisamente dettagliate sullo stato dell'ammasso roccioso e sulla geometria delle discontinuità.

La tecnica a riflessione ha consentito d'intercettare le inversioni di velocità (non possibile con la tecnica a rifrazione) e di raggiungere, mediante le esclusive sorgenti vibratorie di energia, una profondità d'indagine che si può stimare intorno ai 200 metri di profondità dal piano campagna.

7. CONCLUSIONI

La tecnica della sismica a riflessione ad alta risoluzione applicata alla rupe di San Leo lungo la parete est ha fornito interessanti informazioni sulla geometria della base dell'ammasso roccioso calcareo-arenitico (la Rupe di San Leo) a contatto con il sottostante "substrato" argilloso, rivelando la sua enorme potenzialità come metodo investigativo in contesti geologici come quello di San Leo, avvalendosi di sondaggi profondi come elemento di taratura. Altro dato di estremo interesse è l'individuazione di importanti discontinuità nell'ammasso roccioso che risultano

particolarmente sviluppate in profondità, tanto da raggiungere il contatto tra ammasso roccioso e le sottostanti argilliti del substrato. Tali estese strutture, con ogni probabilità, si possono ascrivere al sistema di fratture a cui appartiene quella lungo cui si è generato il distacco di 330.000 m³ di roccia nel crollo del 2014 (Borgatti et al., 2014; Lucente, 2014).

Questi primi risultati suggeriscono di estendere l'investigazione con tecnica sismica a riflessione anche agli altri lati della rupe per giungere alla definizione compiuta della geometria del contatto tra le calcareniti della rupe e le argilliti del substrato, in modo da integrare e perfezionare il modello tridimensionale ottenuto con dettagliati rilievi di superficie (nuvola di punti, DTM, DEM etc.).

Allo stesso tempo, attraverso il dato sismico è possibile integrare il quadro delle conoscenze strutturali a scala dell'intera rupe, contribuendo in maniera rilevante alla costruzione del modello geologico 3D di riferimento e alla successiva modellazione numerica a scala della placca rocciosa in termini sia di afflussi-deflussi idrici che di sforzi-deformazioni.

BIBLIOGRAFIA

- BAKER, G. S. (1999). Processing Near-Surface Seismic Reflection Data: A primer, Course Note Series-Soc. Expl. Geophys., 9, 1-7.
- BOADU, F. K. and LONG, L. T.: Effects of fractures on seismic wave velocity and attenuation, Geophys. J. Int., 127, 86-110, 1996.
- 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).
- BRACCI A.E. (1978). Seismic data processing at the C.G.G. digital center for Agip in Tripoli, Libia.
- BRACCI A.E. (1985). Prospezione geofisica con metodo sismico a riflessione per indagini geognostiche ed elaborazioni dati. Note Geoexploration.
- BROUWER, J., MATSUBARA, Y., KAIDA, Y. Y. and TAKAHASI, T.: Shallow to very shallow high-resolution reflection seismic using a portable vibrator system, Geophysics, 63, 1295-1309, 1998.
- DRUIVENGA, G., GROSSMANN, E., GRÜNEBERG, S., POLOM, U., and RODE, W. (1986). Transportabler Scherwellenvibrator, Deutsches Patent-und Markenamt, Offenlegungsschrift DE 103 27 757 B4, 2011.
- HATTON, L., WORTHINGTON, M. H., MALIN J.: Seismic Data Processing-Theory and Practice, Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- HELBIG K. (1993). High resolution shallow seismic reflection. 53rd Annual International Meeting SEG. Las Vegas.
- KRAWCZYK, C.M., POLOM, U. and BEILECKE, T. (2013). Shear-wave reflection seismics as a valuable tool for near-surface urban applications, The Leading Edge, 32, 256-263, doi:10.1190/tle32030256.1.
- LUCENTE C.C. (2014). Il crollo del versante nord della rupe di San Leo del 27 Febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza. Il Geologo dell'Emilia-Romagna, 52, 6-22.
- MEUNIER, J. (2011), Seismic Acquisition from Yesterday to Tomorrow, SEG.
- RANUCCI M., and MONTI F. (1964). Eventi anomali nei rilievi sismici a riflessione, AGIP Servizio Geofisico, San Donato Milanese.
- YILMAZ, Ö. (2001). Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data Vol. 1, Soc. Explor. Geophys., Tulsa, USA.

La sicurezza non ha prezzo.

Strumenti per:

Monitoraggio sismico

Nanometrics: reti sismiche, servizi e sistemi
Strong Motion, reti Early Warning ...

Monitoraggio ambientale e infrastrutture

Georadar 3D, interferometri SAR e RAR,
elettromagnetometri, inclinometri ...

Geofisica marina e terrestre

Multibeam, SSS, SBP, magnetometri...

tel. +39 02 4830.2175
info@codevintec.it
www.codevintec.it



CODEVINTEC
Tecnologie per le Scienze della Terra

IL MONITORAGGIO GEOTECNICO DELLA RUPE DI SAN LEO

L. BORGATTI*, C.C. LUCENTE**

* *Geologo presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali DICAM - Università di Bologna*

** *Geologo presso l'Agenzia regionale per la sicurezza del territorio e la protezione civile - Servizio Area Romagna*

1. INTRODUZIONE

Diversi sono gli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico eseguiti a San Leo, a partire dalla metà del secolo scorso. Si sono susseguiti interventi strutturali sulle pareti della rupe e nei versanti argillosi circostanti, mentre le prime attività di monitoraggio sono state avviate agli inizi degli anni '90, in forma occasionale e per intervalli di tempo ridotti, sulla fortezza e la via di accesso dell'abitato, lungo il versante sud della rupe.

Dopo il crollo del 2014 che ha interessato lo spigolo nord-est della rupe di San Leo (Figura 1), è stato installato un monitoraggio geotecnico permanente, automatizzato e in remoto, a presidio della strada di accesso alla fortezza e della parte di abitato che si sviluppa sul lato nord della rupe. Tale sistema, oggi in piena attività, è stato avviato nell'aprile del 2014 con successive fasi d'implementazione (un ulteriore aggiornamento è in previsione) con l'intento di mantenere il sistema efficiente e duraturo nel tempo considerato il ruolo fondamentale che svolge nell'ambito del Piano di emergenza della rupe di San Leo (Lucente, 2014a). Il monitoraggio geotecnico assume un ruolo strategico nel contrasto al dissesto idrogeologico, sia in termini di protezioni civili che di supporto alla progettazione di interventi strutturali, essendo uno strumento assolutamente indispensabile per controllare nel tempo l'evoluzione di un fenomeno franoso e per comprenderne il comportamento anche in relazione a diversi fattori esterni preparatori e d'innesco.

Oggi, rispetto al passato, è aumentata la consapevolezza sull'importanza del monitoraggio delle frane come mezzo di prevenzione e come misura di mitigazione del rischio idrogeologico assicurando margini di convivenza con la pericolosità determinata dal dissesto idrogeologico. Il monitoraggio diventa indispensabile quando non è possibile eseguire interventi strutturali per ragioni logistiche e/o di sicurezza; altre volte viene impiegato come misura urgente e temporanea che anticipa un intervento strutturale, ferma restando l'abitudine di accompagnare sempre gli interventi strutturali con il monitoraggio per testarne l'efficacia nel tempo, soprattutto in casi rilevanti in termini di



Figura 1.
Vista panoramica della frana di crollo del 2014 da elicottero (Lucente, 2014a).

pericolosità e di rischio. Risulta, pertanto, quanto mai opportuna la dettagliata progettazione del sistema di monitoraggio; questo processo passa necessariamente attraverso un'approfondita conoscenza del fenomeno franoso da monitorare e del contesto ambientale, avendo ben presente cosa si intende monitorare e con quali obiettivi.

Il sistema di monitoraggio della rupe di San Leo per come è stato concepito e strutturato può essere ritenuto a tutti gli effetti un intervento non strutturale di mitigazione del rischio idrogeologico. Svolge difatti la funzione di protezione civile a presidio di un'ampia fascia della rupe, rendendo possibile la convivenza con il pericolo di crollo e quindi l'accettazione del rischio condizionato dal corretto funzionamento della strumentazione. Allo stesso tempo, i dati di monitoraggio rappresentano un elemento essenziale per la conoscenza del fenomeno franoso: l'analisi del dato storico consente di osservarne il comportamento nel tempo, anche in relazione a fattori esterni (piogge, attività sismica, escursioni termiche) e di valutare le condizioni critiche di un collasso incipiente.

Nelle pagine a seguire viene illustrato il sistema di monitoraggio della rupe di San Leo a distanza di alcuni anni dalla sua installazione con l'obiettivo di fornire un esempio di sistema efficiente e duraturo nel tempo quando, purtroppo, ancora oggi si assiste a casi poco virtuosi di sistemi di monitoraggio installati ma poi puntualmente abbandonati, con spreco di denaro pubblico. Questa è anche l'occasione per presentare una prima valutazione sulla serie storica dei dati avendo ormai raccolto quattro anni di misure.

2. IL DISSESTO IDROGEOLOGICO DELLA RUPE E IL CROLLO DEL 2014

A causa del contesto geologico e geomorfologico in cui si colloca, la rupe di San Leo presenta una forte predisposizione al dissesto idrogeologico. Su tutto il perimetro della rupe sono presenti evidenze di frane di varia entità che vanno dal semplice distacco di piccole porzioni di roccia aggettante al crollo di cospicue masse rocciose con conseguente arretramento del fronte (Benedetti et al., 2011). Tutta la rupe è intensamente fratturata presentando più sistemi di fratture che la suddividono in blocchi progressivamente ribassati verso i margini, quale effetto di processi tettonici e gravitativi (fossili e recenti) subiti nel corso della sua storia geologica.

Il contrasto di rigidità tra la placca rocciosa calcarea e calcarenitica e il substrato argilloso porta a un complesso stato di sforzo nella rupe e ad una progressiva apertura delle fratture disposte all'incirca parallelamente alle pareti ai margini della placca. Scivolamenti e colate nel substrato argilloso e nei depositi che lo ricoprono, determinati dall'azione erosiva dei fossi Campone e Seripa su materiali disgregati e alterati, producono ampie cavità al contatto tra la placca rocciosa e le argilliti. Viene così a mancare una base di appoggio a porzioni dell'ammasso roccioso con conseguenti crolli per scalzamento al piede. Ciò è quanto avvenuto con il recente crollo del 2014 lungo il versante nord della rupe di San Leo che ha coinvolto un volume di roccia pari a 330.000 m³ e ha generato un arretramento del ciglio della parete di circa 30 metri (Lucente, 2014a; Figura 1).

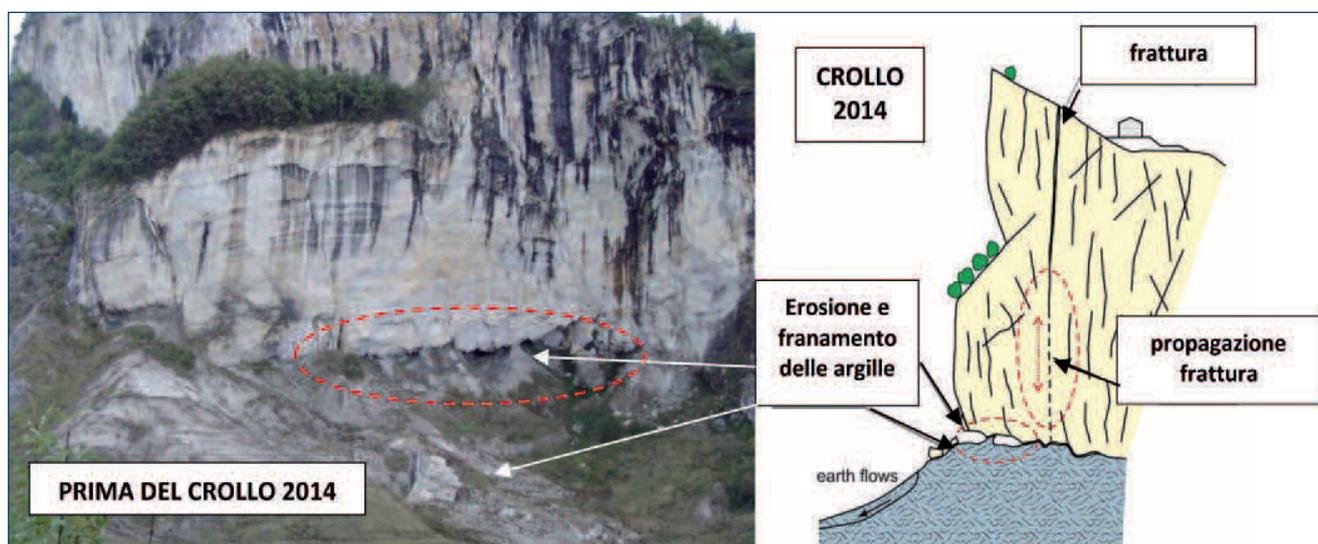
La cinematica di queste grandi frane di crollo non si esaurisce probabilmente nei soli fenomeni localizzati ai margini della placca rocciosa per incipiente fratturazione ma può es-

sere collegata a deformazioni gravitative profonde, sollecitate dal carico litostatico della placca rocciosa gravante sulle argille (Cancelli & Pellegrini, 1987; Caturani et al., 1991). Ciò potrebbe generare cedimenti differenziali nell'ammasso roccioso accompagnati da rifluimenti delle argille sature, a comportamento plastico, verso le zone esterne della placca rocciosa determinando anche rigonfiamenti alla base della rupe. L'evoluzione geomorfologica della rupe e dei versanti sottostanti è dunque condizionata dalle interazioni causa-effetto che si instaurano tra l'ammasso roccioso rigido e le argille a comportamento plastico. Per i crolli a grande scala come quelli che di recente hanno interessato il versante nord della rupe, i meccanismi di deformazione e di instabilità gravitativa possono essere ricondotti a: 1. infiltrazione d'acqua entro le fratture aperte e conseguenti processi di alterazione delle superfici di discontinuità con sviluppo di forme pseudo-carsiche e incremento dell'apertura delle fratture stesse; 2. rimaneggiamento e rifluimento delle argille specialmente verso i bordi della placca dove il confinamento laterale è minimo; 3. saturazione delle argilliti basali per la presenza d'acqua di infiltrazione proveniente dall'ammasso roccioso fratturato sovrastante; la progressiva riduzione della resistenza al taglio induce colamenti e scivolamenti ai bordi della placca; 4. scalzamento delle ripide pareti rocciose fratturate dovuto alla sistematica mobilizzazione delle argilliti basali e predisposizione al crollo/ribaltamento (Figura 2).

La riduzione dei parametri geotecnici delle argilliti sotto la rupe e la rimozione di porzioni di substrato argilloso ai bordi sono fenomeni ampiamente osservati e probabilmente agiscono in concomitanza. Con la rimozione delle porzioni più esterne e superficiali delle argilliti anche i livelli più interni e profondi subiscono degradazione e alterazione e ciò porta

Figura 2.

Nella foto ante crollo 2014 si apprezza la sottoescavazione alla base della rupe. A destra uno schema in sezione dell'ammasso roccioso che illustra le condizioni della parete appena prima del crollo: sottoescavazione alla base e presenza di grande frattura in evoluzione (Borgatti et al., 2014).



al progressivo allargamento delle cavità sotto la rupe. Da notare che prima del crollo del febbraio 2014 sono state rilevate cavità profonde anche 20 metri (Fig. 2).

Per riprodurre il meccanismo di rottura osservato è comunque determinante la presenza delle fratture subverticali alla sommità della parete la cui apertura, come già osservato, è promossa dallo sforzo tensionale indotto dall'interazione tra la placca rocciosa e il substrato argillitico e come emerge dalla modellazione numerica circa l'analisi dei fattori predisponenti al crollo (Spreafico et al., 2015). I materiali mobilitati nei fenomeni di crollo e negli scivolamenti-colate a carico del substrato argilloso finiscono per amalgamarsi in una coltre di frana a composizione eterogenea che ingloba e/o sostiene blocchi rocciosi anche di dimensioni rilevanti come testimoniato dai recenti crolli del 2006 e del 2014 e dal ritrovamento di grandi blocchi sepolti nella spessa coltre detritica che occupa l'asse vallivo del fosso Campone (Lucente, 2014b).

Accanto ai fenomeni di crollo e ribaltamento a grande scala dipendenti direttamente da processi di scalzamento al piede, vi sono fenomeni franosi minori che si manifestano per crolli e/o scivolamenti roccia su roccia lungo piani di frattura basali a franapoggio e per crolli e/ribaltamenti di lame rocciose verticali isolate a tergo da fratture parietali. Tale tipologia di frana si manifesta in maniera diffusa su tutto il perimetro della rupe di San Leo in funzione della intersezione delle principali discontinuità e della immersione della parete (vedi ad esempio la parete est). Infine, in corrispondenza di zone intensamente fratturate e caratterizzate da un fitto clivaggio per dissoluzione, presenti ad esempio localmente lungo le pareti sud ed est, si possono verificare crolli generalizzati della porzione più superficiale.

3. L'INDAGINE GEOSTRUTTURALE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Dopo il crollo del 2014, è stata avviata un'attività di studio complessa e multidisciplinare finalizzata alla comprensione del fenomeno franoso attraverso la determinazione dei volumi coinvolti e, soprattutto, dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso (Rilievi svolti da Enser e Alpigeo; in Lucente, 2014).

La determinazione dell'assetto strutturale della rupe di San Leo si è basata sul rilievo delle fratture visibili sia sulla sommità dell'ammasso roccioso che in parete. Il rilevamento geomeccanico ha riguardato la porzione nord orientale della rupe, attorno al fronte del crollo (Figura 1) ed il rilievo in parete si è concretizzato attraverso una serie di calate lungo la parete nord (sede del crollo 2014) e la parete est.

Il rilievo geostrutturale in sommità ed in parete ha messo alla luce la presenza di quattro famiglie di discontinuità principali identificate con sigla convenzionale K1, K2, K3 e K4 (Figure 3, 4 e 5) con l'aggiunta della stratificazione denominata Ks (confronta con il primo contributo di questo volume "La geologia della Rupe di San Leo"). 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 visibili, denominate K3.1 e K3.2, aperte anche diversi centimetri e persistenti, analogamente alla frattura che ha generato la

Figura 3.
Traccia delle principali fratture sulla sommità della rupe (famiglie K1, K2, K3 e K4; da Lucente, 2014a).





Figura 4.
Alcune immagini della frattura K3.2 (vedi ubicazione nelle Figure 3 e 7). La frattura lungo cui è avvenuto il distacco appartiene alla stessa famiglia di fratture (da Lucente, 2014a).

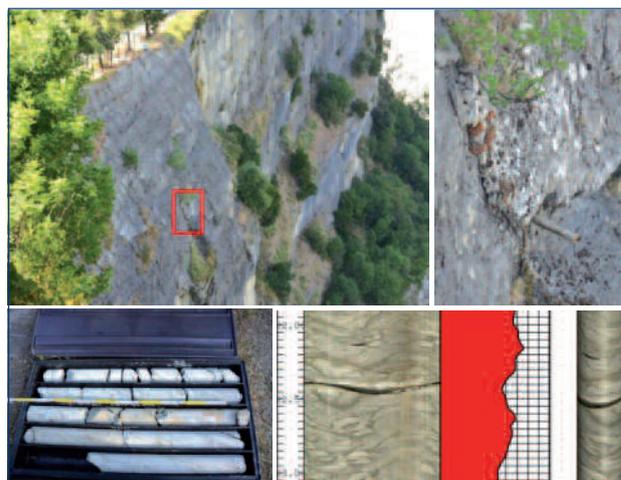


Figura 5.
Tracce delle principali fratture lungo la parete nord, fronte del crollo 2014 (da Lucente, 2014a).

nicchia di crollo dell'evento del febbraio 2014 (Figura 5). La famiglia K4 è circa parallela alla famiglia K1, ma mostra un'inclinazione variabile tra i 30 e i 60 gradi. Ulteriori informazioni di carattere geostrutturale sono state fornite dai carotaggi continui. Sono stati realizzati un sondaggio verticale profondo e diversi sondaggi sub-orizzontali, attorno all'area del crollo del 2014 (parete nord e parete est della rupe), il cui dato è stato integrato con il rilievo di terreno. Ogni perforazione è stata oggetto di video-ispezione con telecamera ottica (Figura 6). Nel corso delle perforazioni sono state intercettate in profondità, all'interno dell'ammasso roccioso, diverse fratture riconducibili alle principali famiglie di discontinuità individuate in superficie. I sondaggi sono risultati fondamentali nella determinazione dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso, rivelando l'esistenza di molte discontinuità che in superficie sono spesso mascherate dalla vegetazione o da manufatti antropici (es. strade, fabbricati). Il rilievo ottico eseguito all'interno di ciascun foro è risultato particolarmente utile e funzionale in quanto ha fornito indicazioni sull'orientamento (azimut e immersione) delle discontinuità, sul loro grado di aperture e alterazione e, in particolare, sulla esatta profondità delle fratture ri-

spetto alla testa del carotaggio (piano campagna), fornendo in tal modo informazioni indispensabili per la posa della strumentazione di monitoraggio in foro (Figura 6).

Figura 6.
Sondaggio 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 (da Lucente, 2014a).



4. IL SISTEMA DI MONITORAGGIO

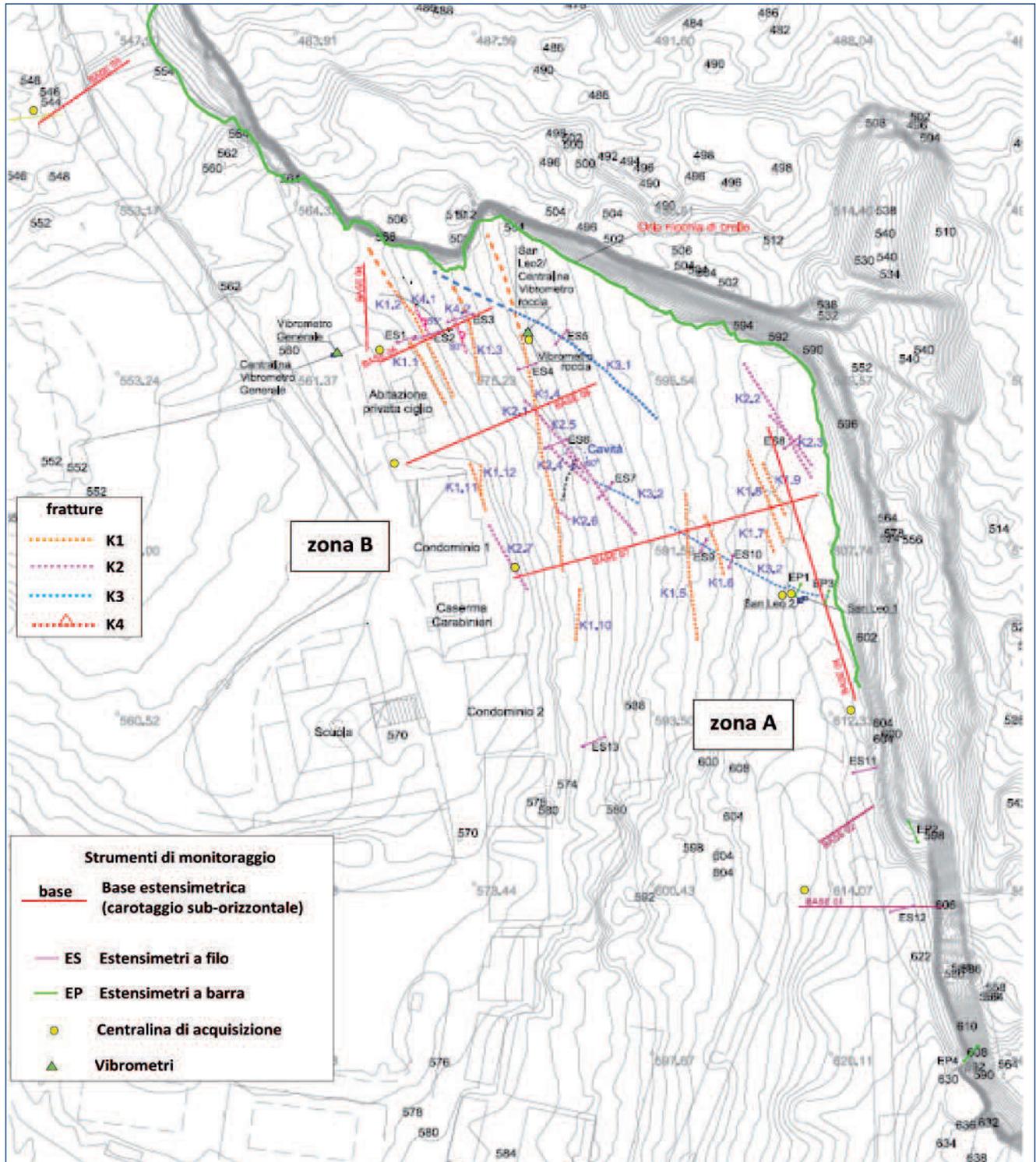
4.1 Architettura e tipologia strumenti

L'architettura del sistema di monitoraggio, intesa come disposizione e tipologia della strumentazione, deriva dai ri-

lievi eseguiti in sommità e in parete e tiene conto delle risultanze dei sondaggi a carotaggio continuo e del rilievo ottico eseguito in foro. In Figura 7 è rappresentata l'ubicazione della strumentazione (centraline di acquisizione ed estensimetri).

Figura 7.

Ubicazione della strumentazione di monitoraggio. Sono riportate anche le principali fratture oggetto di monitoraggio. Gli strumenti sono a presidio della zona A (via di accesso alla fortezza, parete est) e della zona B (abitazioni).



L'installazione della strumentazione è avvenuta in due fasi successive: inizialmente è stata avviata l'installazione dei sensori di superficie e, successivamente, quella dei sensori profondi, all'interno dell'ammasso roccioso. Si tratta sostanzialmente di estensimetri per la misura dell'apertura della discontinuità (misura gli spostamenti tra i due lembi di una frattura). In generale, la tipologia di estensimetro è stata scelta in relazione alle caratteristiche delle principali fratture e alla morfologia del sito di installazione.

Estensimetri. Per il controllo delle fratture in superficie sono stati impiegati n. 13 estensimetri a filo (ES1-13; Figura 8) e n. 4 estensimetri a barra (EP1-4; Figura 9), posti

Figura 8.

Estensimetro a filo sulla sommità della rupe (ES 10) installato a cavallo della frattura; per l'ubicazione in pianta si rimanda alla Figura 7.



a cavallo delle fratture ritenute più significative. I primi forniscono una buona precisione ma le misure possono essere condizionate da particolari situazioni ambientali come presenza di neve al suolo, formazione di ghiaccio, passaggio di animali, crescita della vegetazione, fulminazioni etc. Possono essere installati prevedendo fili lunghi anche fino a 20 metri, ma una maggiore lunghezza del filo implica una maggiore suscettibilità agli inconvenienti ambientali citati in precedenza. Gli estensimetri a barra (potenziometri) offrono maggiore affidabilità e precisione rispetto agli estensimetri a filo e risultano protetti rispetto alle condizioni ambientali, ma con il limite di non poter essere impiegati per distanze superiori ai 2 metri tra i due punti di fissaggio.

Per il controllo degli spostamenti in profondità sono stati impiegate n. 23 basi estensimetriche posizionate all'interno dei fori di carotaggio (Figura 10). Complessivamente sono stati strumentati n. 8 fori (vedi ubicazione in Figura 7). Ogni base è costituita da un'asta in acciaio che collega il punto di ancoraggio all'interno del foro (a profondità prestabilita a tergo di una frattura) con la superficie, fissata mediante apposita piastra. L'asta è opportunamente protetta da una guaina anti-attrito che ne favorisce lo scorrimento. Il movimento delle aste rispetto alla testa di riferimento installata in superficie permette di determinare gli spostamenti che avvengono in profondità nell'ammasso roccioso, rilevati da apposito trasduttore di spostamento. Sempre in testa è montata una scatola di derivazione che rappresenta una protezione contro le sovratensioni. Si è scelto di ricor-

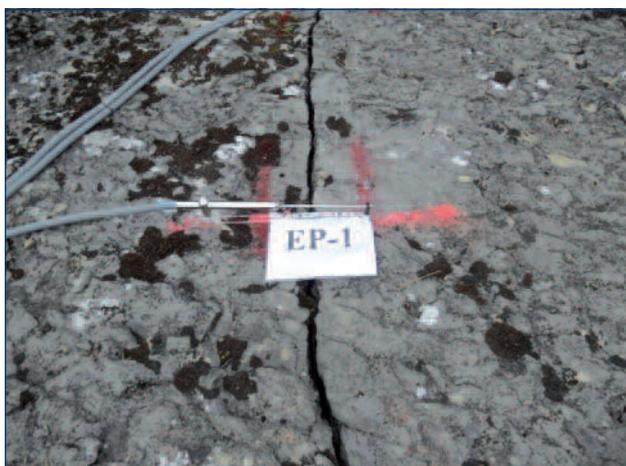


Figura 9.

Esempi di estensimetro a barra sulla sommità della rupe (EP1) e in parete (EP4). L'estensimetro EP1 è posto a controllo della frattura K3.2 (confronta con Figura 5).



Figura 10.

Basi estensimetriche in foro. a) Durante le fasi di installazione con l'introduzione in foro dell'asta estensimetrica; b) installazione terminata mediante cementazione della piastra di testa a tre basi.

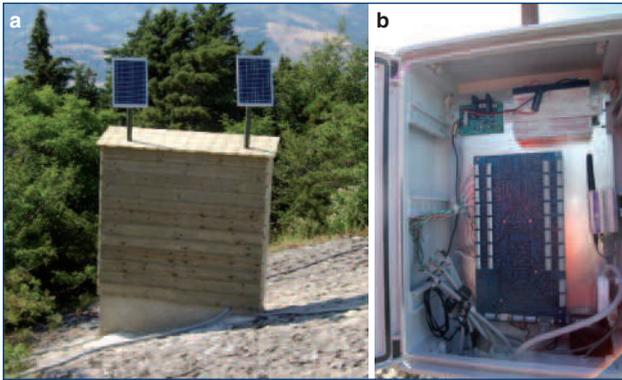
TABELLA 1.

Estensimetri multibase in foro con indicazione delle profondità di posa delle basi per ciascun foro.

SONDAGGIO Foro (m)	PROFONDITÀ	BASE 1 (m)	BASE 2 (m)	BASE 3 (m)	CENTRALINA d'acquisizione	DATA d'installazione
B01	32.50	32.00	22.80	11.60	SanLeo10	luglio 2014
B02	14.80	14.50	7.80	=====	SanLeo10	luglio 2014
B03	25.10	24.50	15.95	8.70	SanLeo4	febbraio2015
B04	20.70	19.90	13.50	7.50	SanLeo5	febbraio2015
B05	28.20	27.75	23.40	15.00	SanLeo5	febbraio2015
B06	46.60	44.60	29.20	13.70	SanLeo6	febbraio2015
B07	71.00	70.50	52.10	10.70	SanLeo7	febbraio2015
B08	67.20	66.50	54.20	19.00	SanLeo8	febbraio2015

Figura 11.

a) Centraline di acquisizione posizionate all'interno di struttura in legno per la loro protezione; in evidenza i pannelli solari. b) Interno di una centralina di acquisizione e trasmissione dati, alloggiata in scatola di protezione (box IP65).



rere a estensimetri a tre basi (tranne in un caso) che consentono di controllare separatamente più tratti del foro, compresi tra l'ancoraggio e il piano campagna. Gli ancoraggi sono quindi cementati a quote diverse in corrispondenza delle diverse fratture da controllare. Da notare che l'estensimetro a tre basi consente di adottare perforazioni con diametro tradizionale di 101 mm mentre oltre le tre basi il diametro del foro di alloggiamento deve essere maggiore di 101 mm. Nella Tabella 1 sono indicate le profondità di installazione delle basi per ciascun sondaggio: a fondo foro e in corrispondenza delle fratture da controllare. La scelta delle fratture da monitorare si è basata: i) sull'entità dell'apertura della frattura (determinata con precisione mediante il dato del rilievo ottico), ii) sull'orientamento della frattura e sul grado di alterazione della roccia (apprezzabile sia nella video-ispezione che nel campione di carota) e iii) sulle informazioni relative a perdite d'acqua avvenute durante l'esecuzione della perforazione.

I sensori installati afferiscono complessivamente a n. 10 centraline di acquisizione e trasmissione dei dati (Figura 11).

Centralina di acquisizione e trasmissione dati in remoto. Per i sistemi di monitoraggio dove l'acquisizione e la trasmissione dei dati avviene in automatico, le centraline

(unità periferiche) verso cui confluiscono i segnali degli strumenti e da cui vengono ritrasmessi ad utenti remoti, svolgono un ruolo essenziale nel buon funzionamento del sistema. Il sistema di acquisizione dati viene definito in funzione delle specifiche del sistema e delle sue finalità. La configurazione effettiva del sistema dipende in misura importante anche dalla struttura di gestione del sistema stesso (Ardillo et al., 2005).

L'unità automatica per l'acquisizione e la trasmissione dei dati strumentali è dotata nelle sue parti principali da *data-logger* e relativo *software*, dal modulo di trasmissione dati e dal sistema di alimentazione (Figura 15).

Il *datalogger*, a 8 o più canali di entrata del segnale, un canale per sensore, è dotato di specifico software che consente, oltre all'amplificazione e alla conversione dei segnali, la registrazione, la memorizzazione e l'archiviazione dei dati, nonché la programmazione e la gestione degli stessi: avviamento, impostazione in remoto dei periodi di campionamento, trasmissione dati, segnali di allarme ecc. Il *datalogger* ha in dotazione un dispositivo (*multiplexer a relé*) che in caso di cablaggi complessi, quando un sensore non è più funzionante garantisce comunque la continuità di tutti gli altri sensori collegati alla centralina.

La trasmissione dei dati dalla centralina a centro remoto, su specifico sito ftp (piattaforma *web* dedicata), è garantita da modem GPRS. Il *Datalogger* e il modem GSM/GPRS sono opportunamente alloggiati in custodia dedicata per la protezione (box IP 65).

Nel caso di San Leo, l'alimentazione per il funzionamento del sistema avviene tramite pannello solare completo di batteria e montato su palo. Il modulo fotovoltaico deve essere sufficiente a garantire sia l'acquisizione che la trasmissione dei dati con un sistema di batterie adeguate, ad alta autonomia, e un regolatore di carica. In assenza di luce deve garantire un funzionamento di almeno 10 giorni.

Collegamenti. Un elemento di particolare rilevanza nella progettazione dei sistemi di monitoraggio è rappresentato dalla modalità di collegamento degli strumenti e delle varie componenti del sistema. Il collegamento previsto tra gli estensimetri e le unità di acquisizione dati (centraline

locali, unità periferiche) è attraverso l'impiego di cavi con la presenza di elementi di raggruppamento rappresentati dalle scatole di giunzione. I cavi devono garantire un'elevata resistenza elettrica (in termini di sezione, resistenza, isolamento) e meccanica (in termini di massima resistenza alla trazione, all'abrasione, ai roditori) e, ovviamente, devono essere resistenti all'acqua.

Tutta la strumentazione è stata, opportunamente, dotata di struttura protettiva per limitare danni accidentali che possono derivare dal maltempo e da animali (vedi esempio in Figura 11).

4.2. Funzionamento

Il sistema di monitoraggio è stato attivato nell'aprile del 2014 a due mesi di distanza dal crollo con estensimetri di superficie ed è stato successivamente implementato tra giugno 2014 e febbraio del 2015 con gli estensimetri profondi.

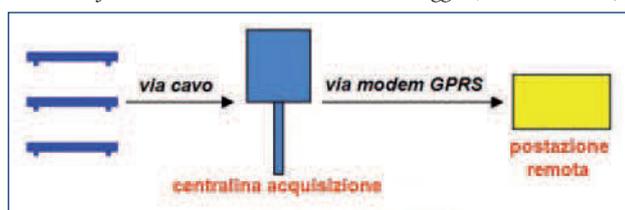
Il funzionamento del sistema di monitoraggio avviene in automatico ovvero la raccolta e la trasmissione del dato avvengono senza la necessità di intervento da parte di un operatore. Lo schema di Figura 12 illustra la struttura e il funzionamento del sistema di monitoraggio in attività a San Leo:

- gli estensimetri installati consentono di misurare le variazioni di distanza fra i due lembi della frattura (apertura/chiusura della frattura);
- gli estensimetri sono collegati, a gruppi e mediante cavi, alle centraline di acquisizione alimentate con pannello solare;
- le centraline di acquisizione (unità periferiche) raccolgono i dati dai sensori collegati ogni 30 minuti (impostazione che può essere variata) e li trasmettono, via GPRS, a postazione remota (server gestionale – centro acquisizione);
- attraverso una piattaforma *web* dedicata è possibile visualizzare, scaricare e gestire i dati in tempo reale.

4.3. Gestione

Per assicurare il buon funzionamento del sistema di monitoraggio, nella fase di gestione del sistema stesso sono comprese tutte quelle attività successive all'installazione una volta che sia stata verificata e collaudata la sua funzionalità (Lucente, 2014b).

Figura 12.
Schema di funzionamento del sistema di monitoraggio (Lucente, 2014a).



Piattaforma *web* su sito ftp. La gestione del sistema di monitoraggio, in automatico e in *real time* (h 24 per 365 giorni l'anno) da postazioni remote, avviene attraverso una piattaforma per il data-base su sito ftp, in area riservata e con pagina *web* dedicata.

Si tratta, in sostanza, di una piattaforma *web* per la validazione, il processamento, la conversione, la gestione e la visualizzazione automatica dei dati di monitoraggio geotecnico-strutturale per sistemi di monitoraggio automatici. La piattaforma contiene tutte le informazioni dell'impianto di monitoraggio, compresi planimetria, sezioni strumentate, schemi di impianto, schede tecniche della strumentazione, fotografie etc. L'inserimento dei dati di monitoraggio nel data-base avviene attraverso la trasmissione degli stessi via GPRS al sito ftp.

Frequenze di lettura. La frequenza delle letture per il monitoraggio geotecnico non è standardizzabile a causa delle differenti tipologie di frane, in termini di velocità di innesco e di propagazione. In linea di massima la frequenza va commisurata alla velocità del fenomeno e alla capacità di gestione della banca dati e ai tempi di trasmissione e archiviazione dei dati e al consumo di energia da parte dei sensori (Ardillo et al., 2005). Risulta quindi molto importante poter modulare la frequenza delle rilevazioni.

Nel caso di San Leo, trattandosi di frane di crollo, ovvero di fenomeni a rapida evoluzione, è stata adottata una frequenza di letture di 15 minuti.

Manutenzione. La manutenzione è estremamente strategica nell'ambito della gestione di un sistema di monitoraggio funzionante in automatico. Si deve infatti garantire il funzionamento del sistema 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.

Le forme di manutenzione da adottare sono due: i) la manutenzione ordinaria con finalità preventive, in quanto è orientata a prevenire malfunzionamenti legati al decadimento naturale della strumentazione, all'influenza di fattori esterni e alla taratura periodica dei sensori; ii) la manutenzione straordinaria con finalità correttive, che viene solitamente attivata, in tempi rapidi (d'urgenza), a seguito di malfunzionamenti verificati e accertati per il ripristino della funzionalità della strumentazione.

Nel caso di San Leo sono previsti almeno due interventi di manutenzione ordinaria per assicurare il buon funzionamento dell'impianto e mantenere in efficienza tutta la strumentazione.

Diversamente, la manutenzione straordinaria viene attivata a seguito di guasti o malfunzionamenti degli strumenti. Nel caso in questione per garantire l'intervento di manutenzione straordinaria in tempi ragionevoli (entro le 48 ore nel caso in questione) sono custoditi a magazzino strumenti di ricambio già pronti per l'installazione.

Ogni intervento di manutenzione prevede un rapporto tecnico sull'attività svolta e sulla strumentazione ripristinata.

Report periodici. L'attività di gestione del sistema di monitoraggio prevede report semestrali sulla strumentazione installata con analisi dei dati registrati e annotazione di misure significative in termini di spostamento a breve e lungo termine, di eventuali anomalie di funzionamento per fattori esterni e/o danneggiamento della strumentazione (Lucente, 2014b).

4.4. Finalità

Il monitoraggio è stato concepito con una duplice finalità:

1. **Funzione di studio e conoscenza** del comportamento dell'ammasso roccioso;
2. **Funzione di allerta/allarme** a supporto del Piano di emergenza di protezione civile.

La finalità di studio consiste nel fornire indicazioni circa la stabilità dell'ammasso roccioso, sui meccanismi di rottura in atto e sulla possibile evoluzione dello scenario di rischio. Inoltre, l'interpretazione dei dati è di supporto per interventi di consolidamento dell'ammasso roccioso e di mitigazione del rischio idrogeologico.

Si tratta di analizzare periodicamente i dati che vengono acquisiti dalle centraline e trasmesse in remoto nel sito *web* dedicato. L'elaborazione prevede l'analisi delle serie storiche per verificare e interpretare il comportamento delle fratture nel tempo e a seguito di particolari eventi esterni quali ad esempio terremoti, condizioni meteorologiche avverse etc. Per ulteriori dettagli e alcuni risultati si rimanda al paragrafo "Analisi dei dati".

La funzione di allarme si basa sull'esistenza di soglie di spostamento prestabilite per cui al superamento di dette soglie l'impianto di allarme invia messaggi sms su rubrica della rete di emergenza definita nel Piano di emergenza "Rupe di San Leo" a salvaguardia della pubblica incolumità. Considerata la tipologia del potenziale dissesto (frana di crollo) e i livelli di rischio, il superamento dei valori di soglia comporta l'immediata evacuazione delle aree potenzialmente interessate come indicato nello specifico piano di protezione civile.

A seguito di valutazioni espresse in sede di Comitato tecnico durante le fasi dell'emergenza (da ENSER e dalle Università di Bologna e Modena-Reggio Emilia), per il sistema di allarme di San Leo sono state scelte soglie differenziali per superamento del valore rispetto alla media delle 24 ore precedenti, il cui valore cambia a seconda del tipo di strumento:

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

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 nei fori B01 e B02, a presidio alla zona del tornante di accesso alla fortezza (zona A, in Figura 7).

- 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 B, in Figura 7).

La scelta delle soglie rappresenta uno degli elementi più critici rispetto ai processi di installazione e gestione del monitoraggio. Non è infatti possibile definire delle soglie a priori ma occorre un congruo periodo di osservazione del dato di monitoraggio, con la consapevolezza che vi possa essere la necessità di dover aggiornare le soglie stesse periodicamente e che è necessario bilanciarne l'affidabilità per assicurare segnalazioni tempestive evitando nel contempo l'accadimento di cosiddetti falsi allarmi. Nelle frane di crollo che interessano ammassi rocciosi fratturati, come nel caso specifico qui trattato, l'individuazione di soglie di allertamento e allarme affidabili è estremamente ardua dal momento che i tempi di preannuncio possono essere estremamente brevi e anche difficilmente correlabili con forzanti esterne come eventi di pioggia.

5. ANALISI DEI DATI: MONITORAGGIO DEGLI SPOSTAMENTI 2015-2018

I dati di monitoraggio degli spostamenti rilevati da tutti gli strumenti installati sono disponibili da febbraio-marzo 2015 e ogni serie temporale è stata analizzata fino al 1 agosto del 2018, in riferimento anche alla temperatura e alle precipitazioni locali, che sono disponibili da settembre 2017. Complessivamente si osserva una risposta correlabile alla variazione della temperatura, sia diurna che stagionale. Le oscillazioni dei valori giornalieri sinora registrati si mantengono al di sotto dei valori di soglia definiti. Si sono manifestati episodi di superamento di soglia con allarme, ma si è trattato di problemi tecnici (fulminazioni, sbalzi di tensione, interruzione del segnale per comunicazioni via GPRS). Si può notare come le singole fratture e/o i singoli strumenti non rispondano però nella stessa maniera alla forzante termica, sia per quanto concerne la risposta in termini di dilatazione/contrazione, che il modulo del vettore spostamento e il tempo di risposta. Alcuni strumenti della stessa tipologia registrano la massima apertura delle fratture in inverno e la massima chiusura in estate (ad es., ES13), al contrario di altri che mostrano apertura d'estate e chiusura d'inverno (ad es., ES12). Questo implica che, a parità di litologia ed esposizione e al netto della deriva strumentale, l'espansione e la contrazione dell'ammasso roccioso, come conseguenza delle variazioni di temperatura, sono condizionati anche dalla geometria della frattura e risultano comunque mascherati dal cinematismo dello spostamento ammesso lungo la frattura stessa, nel contesto della rete di fratture interconnesse. In altri termini, la componente di cosiddetto respiro dell'ammasso roccioso, in parte elastica e accomodata da deformazioni della matrice rocciosa e mutui

spostamenti delle fratture, si traduce in apertura o chiusura dei giunti a seconda della geometria delle singole discontinuità e di quelle ad essa direttamente o indirettamente interconnesse. A questa deformazione se ne aggiunge una irreversibile, che si evidenzia con trend di spostamento che negli anni di monitoraggio si possono stimare con velocità di mm/anno.

In relazione al segnale registrato dai vari strumenti nel periodo di riferimento, di modulo sempre millimetrico o submillimetrico, è possibile formulare una serie di considerazioni, che mirano ad evidenziare la significatività delle singole serie di dati. Tale significatività non dipende dal modulo dello spostamento registrato in sé quanto piuttosto dall'andamento dello stesso, anche in relazione al comportamento di gruppi di sensori che mostrano un comportamento omogeneo rispetto alle forzanti. Si noti anche che lo spostamento registrato rappresenta solo una componente del vettore spostamento totale e che solo una interpretazione 3D dei blocchi rocciosi coinvolti e dei relativi vettori permetterebbe di risolvere il cinematismo a scala di versante. Occorre ribadire che solo un *data set* di lungo periodo permette di fare osservazioni di dettaglio sul comportamento dell'ammasso roccioso e individuare porzioni instabili sulle quali concentrare l'attenzione (vedi funzione 1 in 4.4).

Qui di seguito vengono brevemente commentate le misure acquisite dal sistema di monitoraggio, con riferimento alle figure che rappresentano rispettivamente tutti gli estensimetri a filo (Figura 13), tutti gli estensimetri a barra (Figura 14), tutti gli estensimetri in foro (Figura 15). In Figura 16 è rappresentato un esempio di ciascuna tipologia di strumento per evidenziare l'andamento degli spostamenti in relazione alle variazioni di temperatura stagionali e giornaliere. In figura 17 sono invece rappresentati tutti gli strumenti che misurano la K 3.2 (EP1, EP3, ES9, ES10, EB7 e EB8; frattura rappresentata nelle Figure 4 e 9).

L'estensimetro ES1 controlla la frattura K1.1. Mostra un andamento in chiusura, con velocità costante pari a 1.3 mm/anno. Da osservare come due strumenti differenti (ES1 e ES13, vedi di seguito), localizzati in aree differenti, mostrino andamenti concordi e velocità simili.

L'estensimetro ES2 controlla le fratture K1.2 e K4.1 e mostra un andamento in apertura. ES3 controlla le fratture K1.3 e K4.2 e mostra un andamento in apertura. ES4 controlla la frattura K1.4 e mostra un andamento in chiusura. ES5 controlla la frattura K3.1 e mostra un andamento in chiusura. Il gruppo di estensimetri ES2-3-4-5, pur con risposte strumentali differenti, mostra una relativa stabilità.

L'estensimetro ES6 controlla la frattura K2.1, mentre ES7 controlla le fratture K3.2 e K2.1. I due strumenti sono ubicati a 20 metri di distanza uno dall'altro e mostrano un andamento in chiusura. ES7 ha andamento costante della velocità pari a 3.3 mm/anno. ES6 evidenzia movimenti intermittenti e la velocità interpolata risulta pari a 1.3

mm/anno. Da osservare come i due strumenti mostrino andamenti concordi e velocità sensibili.

L'estensimetro ES8 controlla le fratture K2.2 e K2.3. Mostrano un andamento in apertura mentre nel primo periodo di monitoraggio (2014-febbraio 2015) mostravano chiusura. Le velocità di spostamento sono pari a 0.4 mm/anno.

L'estensimetro ES9 controlla la frattura K3.2 e mostra un andamento in chiusura, mentre ES10 controlla la frattura K3.2 e mostra un andamento in chiusura.

L'estensimetro ES11 controlla una frattura della famiglia K1 in corrispondenza del tornante della strada di accesso alla Fortezza, così come ES12. Pur con risposte strumentali differenti (continua e impulsiva rispettivamente), mostrano una relativa stabilità. La fluttuazione stagionale segue le variazioni di temperatura (apertura in estate e chiusura in inverno). L'estensimetro ES13 controlla la frattura della famiglia K2 a tergo del cosiddetto Condominio 2. Mostra un andamento in chiusura, con andamento costante della velocità pari a 1.2 mm/anno.

Gli estensimetri EP1 ed EP3 controllano la frattura K3.2. L'andamento stagionale degli estensimetri a barra è regolare e sostanzialmente differente rispetto a quello dell'estensimetro a filo, che mostra invece un comportamento impulsivo. L'estensimetro EP2 controlla la placca rocciosa sottostante la strada di accesso alla Fortezza, così come EP4. Il primo mostra un andamento in costante chiusura seppur di modesta entità. L'estensimetro EP4 mostra un andamento in costante apertura seppur di modesta entità. In particolare nel caso di EP4 ed EP2, sia in novembre 2016 che in novembre 2017 si può notare la concomitanza di picchi di spostamento (apertura/chiusura di 0.5 mm) con scosse di terremoto di magnitudo modesta con epicentro nel Maceratese (12.11.2016 e 13.11.2017).

I due estensimetri multibase B1 e B2 controllano la porzione di ammasso roccioso sottostante la strada di accesso alla Fortezza. In B1, la base 1 (la più profonda, ovvero corrispondente alla frattura più prossima alla parete rocciosa) non evidenzia spostamenti, così come le altre due basi 2 e 3. Da notare la differente dilatazione termica tra le tre basi: mentre la 2 e la 3 mostrano i valori minimi a luglio e massimi a febbraio, la 1 mostra i minimi a marzo e i massimi ad agosto. In B2, entrambe le basi mostrano un andamento stabile, entrambe in leggera apertura. Si evidenzia un picco di 24 mm accaduto nell'agosto 2015 e ascrivibile ad una anomalia strumentale. Un secondo evento da segnalare è stato registrato alla fine di gennaio 2017 quando, tra il 21.1 e il 6.2 entrambe le basi hanno registrato una apertura e una chiusura di circa 1 mm. La fluttuazione delle misure in risposta alla temperatura mostra valori minimi a marzo e massimi in agosto, in similitudine a quanto accade in B1, base 1.

Lo strumento EB3 è un estensimetro multibase. Tendenzialmente le tre basi indicano una chiusura e descrivono movimenti intermittenti. Le velocità sono di 0.9 mm/anno nella

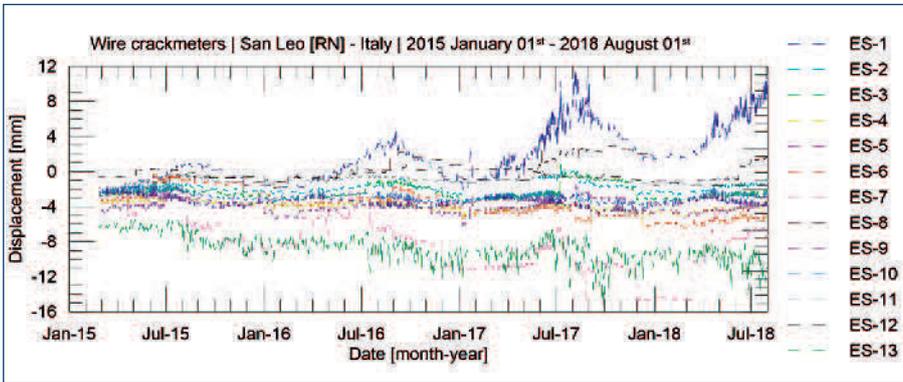


Figura 13.
Estensimetri a filo (spostamenti in mm).
La serie temporale copre il periodo gennaio 2015-1 agosto 2018.

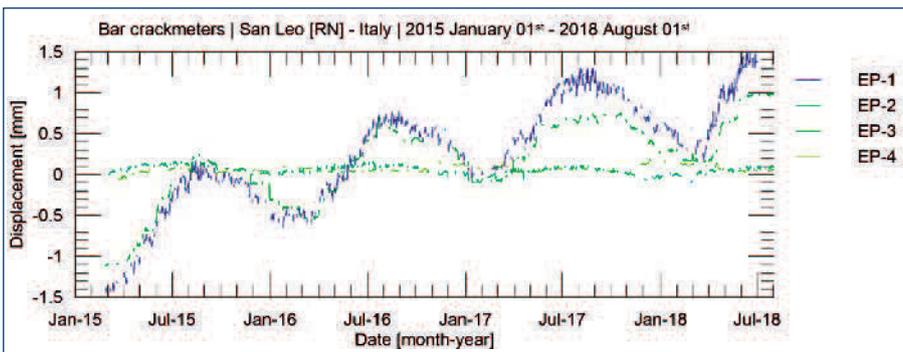


Figura 14.
Estensimetri a barra (spostamenti in mm).
La serie temporale copre il periodo gennaio 2015-1 agosto 2018.

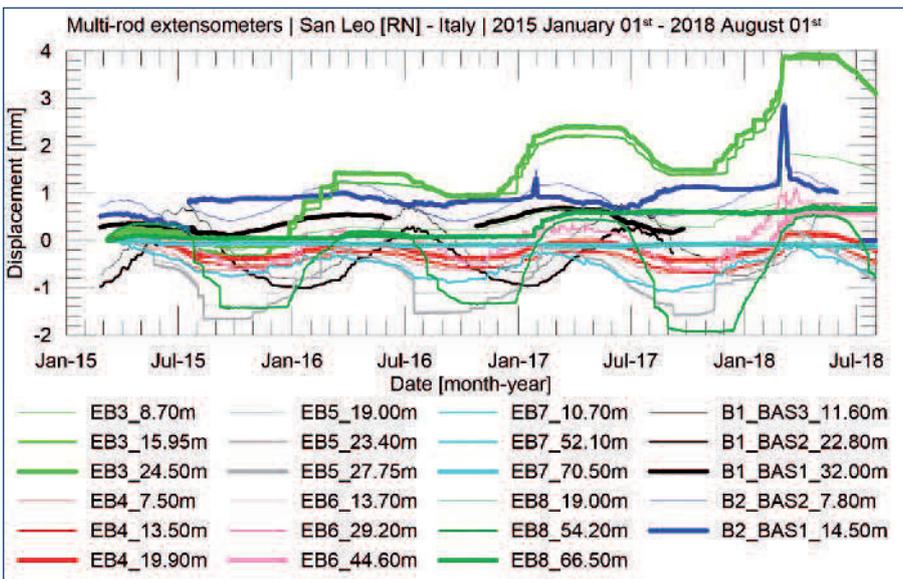


Figura 15.
Estensimetri in foro multibase (spostamenti in mm, basi come da Tabella 1). La serie temporale copre il periodo gennaio 2015-1 agosto 2018.

base 3, 0,8 nella base 2 e 0,3 nella base 3. Sebbene l'ordine di grandezza degli spostamenti sia inferiore rispetto agli strumenti in superficie, il data set è certamente significativo. Infatti si nota che la base più corta (più superficiale ma più interna rispetto alla parete) presenta per prima una marcata accelerazione in occasione dei periodi piovosi autunnali, cui seguono la base 3 e la base 2. Tale sequenza si è presentata in questa modalità sia nell'autunno 2015 che nell'autunno 2016. Nell'autunno 2017 l'accelerazione della base 3 ha preceduto di pochi giorni quella della base 1. Nell'estensimetro multibase EB4, le basi mostrano una re-

lativa stabilità e andamento concorde. La fluttuazione stagionale presenta valori minimi d'estate e massimi d'inverno. Nell'estensimetro multibase EB5, posto in corrispondenza della scarpata della frana del 2014, le basi mostrano una relativa stabilità. La fluttuazione stagionale presenta valori minimi d'estate e massimi d'inverno nelle basi 1 e 2 (variazioni di 1,5 mm in chiusura d'estate poi recuperati in inverno), mentre la base 3 pare non risentire delle variazioni di temperatura presentando un andamento sostanzialmente piatto. Questo differente comportamento consente di escludere che vi sia una deriva strumentale

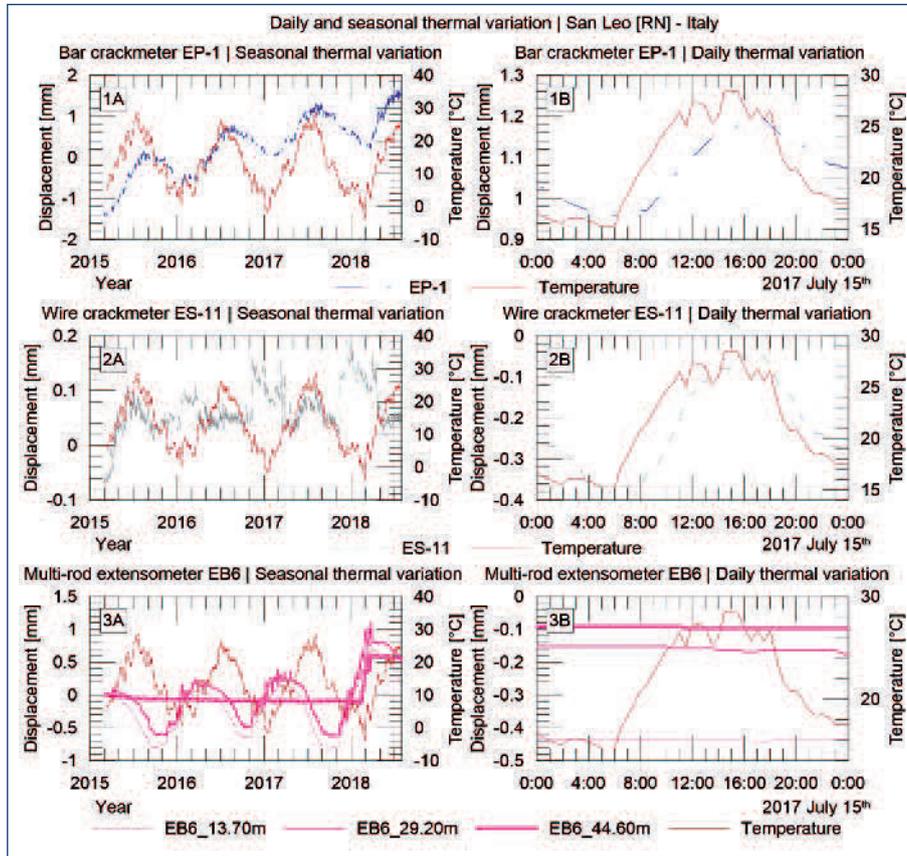


Figura 16. Esempi di misure da estensimetri a barra (1, EP1), a filo (2, ES-11) e in foro (3, EB6) rispetto alle variazioni di temperatura stagionale (a) e giornaliera (b). Osservando i data set delle basi più profonde degli estensimetri multibase insieme alla temperatura rilevata ogni mezz'ora si osserva come in estate, all'innalzamento della temperatura corrisponda una chiusura della frattura seppur di decimi di mm.

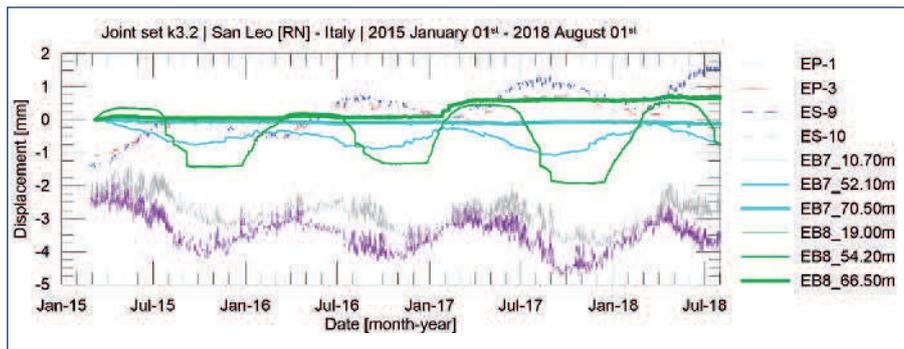


Figura 17. Strumenti che misurano la frattura K3.2 (spostamenti in mm). La serie temporale copre il periodo gennaio 2015-1 agosto 2018.

conseguente alla dilatazione termica della componentistica ma si tratti invece di dilatazioni e contrazioni dell'ammasso roccioso.

Nell'estensimetro multibase EB6, posto in corrispondenza della scarpata della frana del 2014, le basi mostrano una relativa stabilità. Come già osservato in EB5 la fluttuazione stagionale presenta valori minimi d'estate e massimi d'inverno nelle basi 1 e 2 (variazioni di 1 mm in chiusura d'estate poi recuperati in inverno), mentre la base 3 pare non risentire delle variazioni di temperatura presentando un andamento sostanzialmente piatto.

Nell'estensimetro multibase EB7, perforato a tergo della Caserma dei Carabinieri, le basi mostrano una relativa stabilità. Come già osservato in EB5 e EB6, la fluttuazione stagionale presenta valori minimi d'estate e massimi d'inverno,

ma nella sola base intermedia (variazioni di 1 mm in chiusura d'estate poi recuperati in inverno). Nelle basi 1 e 3 le variazioni di temperatura non sono evidenziate, presentando entrambe un andamento sostanzialmente piatto.

Nell'estensimetro multibase EB8, perforato parallelamente alla parete NE, la base superficiale mostra una sostanziale stabilità, delineando un andamento piatto, mentre le basi intermedia e profonda hanno velocità di 0.2 mm/anno e 0.3 mm/anno rispettivamente. Si nota come la base intermedia presenti per prima una marcata accelerazione nel mese di dicembre per poi mostrare apertura a velocità costante nei successivi 3-4 mesi. La base più profonda accelera con un ritardo nell'ordine di uno-tre mesi rispetto alla intermedia. Tale sequenza si è presentata in questa modalità sia nel dicembre 2015 che nel 2016 e nel 2017.

Nei *data set* relativi agli estensimetri a filo che controllano le fratture della famiglia K1, si nota come ES2, ES3, ES4 mostrino andamenti medi confrontabili così come picchi concomitanti. Essi potrebbero quindi effettivamente controllare fratture della stessa famiglia sebbene l'entità dei movimenti possa essere diversa per ragioni di geometria strumento-frattura, oltre che di altre fratture interconnesse. ES11 ha un andamento simile ai primi tre, anche se si localizza nella zona del tornante. ES1 e ES12 hanno invece andamenti differenti. Il primo è stato in un primo tempo confrontabile con il gruppo suddetto, ma dalla primavera 2016 l'andamento degli spostamenti si è distinto dagli altri, sia come fase che come entità. ES12 ha un andamento a scalini ed è pressoché stabile.

Gli estensimetri a filo che controllano in superficie le fratture della famiglia K2 sono ES6, ES7, ES8. Essi mostrano andamenti medi confrontabili così come picchi concomitanti e potrebbero quindi controllare fratture della stessa famiglia con comportamenti congruenti, sebbene l'entità dei movimenti possa essere diversa per ragioni di geometria strumento-frattura, oltre che della presenza di altre fratture interconnesse in superficie e in profondità. ES11 ha un andamento differente rispetto ai primi tre, anche perché si localizza in una zona distale e diversa dal punto di vista morfologico.

Osservando i *data set* relativi agli estensimetri a filo e a barra che controllano le fratture della famiglia K3 si nota come EP1 e EP3 mostrino andamenti confrontabili e possano effettivamente essere rappresentativi della stessa frattura K3.2. Anche ES9 ed E10 mostrano andamenti confrontabili e possono essere considerati rappresentativi della stessa frattura K3.2, benché l'andamento di questi due sia differente rispetto ai primi due. Questo potrebbe essere imputabile alla tipologia di strumento. S5 ed E7 mostrano andamenti medi differenti tra loro e rispetto ai suddetti in quanto controllano fratture differenti, anche se appartenenti alla stessa famiglia. ES7, in particolare attraversa due fratture aperte appartenenti a due differenti famiglie quindi misura la componente derivante dall'eventuale spostamento di entrambe.

I *data set* relativi agli estensimetri a filo che controllano le fratture della famiglia K4 comprendono ES2 ed ES3, che mostrano andamenti medi confrontabili tra loro e possono essere considerati effettivamente rappresentativi della stessa frattura. Si noti la medesima risposta in chiusura agli eventi di pioggia autunnale.

6. CONCLUSIONI

Sulla base dei rilievi di campagna e degli studi di dettaglio condotti negli ultimi anni è stato possibile approntare una nuova cartografia geologica della rupe di San Leo e caratterizzare i materiali geologici che costituiscono la rupe, ovvero la matrice rocciosa litoide e il substrato argillitico e descrivere i principali sistemi di discontinuità che attraversano l'ammasso roccioso. Inoltre, sono stati definiti i cinemati-

smi dei potenziali fenomeni di frana in roccia nei diversi settori della rupe anche in relazione al comportamento dell'acquifero ospitato nell'ammasso roccioso ed è stato possibile analizzare i meccanismi di instabilità globale delle pareti rocciose della rupe tramite la analisi a ritroso dell'evento del febbraio 2014. In particolare, sono state descritte le cause predisponenti a medio e lungo termine degli eventi di instabilità globale (come nell'esempio del crollo del 2014) ed è stato osservato il comportamento dell'ammasso roccioso grazie ai dati di monitoraggio.

Come ampiamente documentato, la presenza di estese cavità, la cui geometria dipende dalla forma del contatto stratigrafico e/o tettonico tra ammasso roccioso e argilliti, oltre che dal gradiente e quindi dalle vie di flusso delle acque sotterranee, lascia settori della rupe senza sostegno alla base. In questi settori, se esistono fratture persistenti che isolano grandi blocchi, sarà la sola resistenza dei ponti di roccia a garantire la stabilità ma, quando questa sarà vinta, il crollo di ampie porzioni sarà inevitabile. Inoltre, gli sforzi indotti nell'ammasso prima e dopo tali grandi distacchi inducono la formazione di fratture parietali che si configurano come i coronamenti dei prossimi distacchi.

Appare quindi fondamentale continuare ad investigare e monitorare il comportamento delle fratture individuate sulla sommità e all'interno della placca, sebbene i vettori spostamento misurati in superficie e in profondità pongano complesse problematiche di interpretazione soprattutto in chiave di allertamento e allarme. In ogni caso, allo stato attuale, il risultato più rilevante del monitoraggio delle fratture in superficie e in profondità non risiede tanto nella stima dello spostamento cumulato (in molti casi submillimetrico) e delle possibili cause scatenanti (variazioni di temperatura e in particolare periodi freddi con formazione di ghiaccio, piogge intense, accumulo del manto nevoso e conseguente scioglimento, sismi), quanto piuttosto nella individuazione delle fratture attive, ovvero di quelle che al netto della deriva e degli errori strumentali mostrano un trend di spostamento riconoscibile e compatibile con il cinematismo del blocco monitorato. Seppure siano in corso di realizzazione estensive opere di consolidamento di alcune porzioni della rupe, è necessario continuare il monitoraggio e mantenere il sistema preposto concentrando l'attenzione laddove i dati di spostamento delle fratture monitorate mostrino sensibili e concordi andamenti in apertura/chiusura, ad esempio sull'area del tornante lungo strada di accesso alla fortezza (cf. Estensimetro 13) e alle spalle dei condomini (cf. Estensimetro 6).

D'altro canto, il sistema di monitoraggio svolge funzione di protezione civile essendo posto a presidio delle aree ritenute a maggiore rischio, a ridosso del fronte del crollo del 2014. Immediatamente dopo il crollo venne definita un'ampia area a rischio idrogeologico molto elevato con l'evacuazione di alcune abitazioni private, la caserma dei carabinieri e la scuola, nonché la chiusura della strada di accesso alla for-

tezza. È stato possibile aggiornare lo scenario di rischio grazie anche alla installazione e all'avvio del sistema di monitoraggio, consentendo la riapertura della scuola e della caserma dei carabinieri, il rientro di alcune delle famiglie evacuate e il transito lungo la strada che porta alla fortezza, sia pure in forma limitata con navetta autorizzata.

Attualmente, il sistema di monitoraggio descritto in queste pagine supporta il piano di emergenza dell'abitato San Leo che prevede l'evacuazione delle aree monitorate in caso di segnale di allarme, assumendo un ruolo essenziale nella gestione dell'emergenza e rendendo possibile una convivenza sostenibile con il rischio idrogeologico. Ciò impone di mantenere il sistema sempre attivo e perfettamente funzionante come è stato fatto in questi primi anni dall'avvio del monitoraggio. Si tratta di un compito non facile in sistemi di monitoraggio così complessi e articolati come quello in funzione a San Leo.

In considerazione del valore strategico assunto dal monitoraggio in termini di resilienza e sulla scorta dell'esperienza sinora maturata, si ritiene indispensabile estendere il sistema di monitoraggio, che attualmente controlla le fratture nello spigolo nord-est della rupe, anche alla parete sud dove sono esposti al rischio idrogeologico l'abitato di San Leo, la strada di accesso all'abitato e la stessa fortezza.

Inoltre, non si deve sottovalutare il ruolo delle acque sotterranee nella preparazione oltre che nell'innescare dei grandi crolli. Risulta pertanto necessario, accanto al controllo delle fratture, implementare un sistema di monitoraggio idrogeologico dell'ammasso roccioso e delle aree alla sua base (fosso Campone e fosso Seripa). Allo stato attuale, è in corso il monitoraggio della sorgente sul terreno privato a sud della rupe, ed è in programma il ripristino del piezometro automatico installato per un breve periodo nel foro di 110 m in corrispondenza del tornante che porta alla fortezza.

Al di là della funzione di protezione civile che il sistema di monitoraggio di San Leo svolge, l'obiettivo ultimo è la realizzazione di un sistema a tutto campo che possa investigare il comportamento dell'intero ammasso roccioso, sia per la componente strutturale (fratture) che per quella idrogeologica, a supporto della progettazione di interventi strutturali che ancora si rendono necessari per la riduzione del rischio idrogeologico a San Leo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dott. Ing. Giacomo Tedesco che ha curato la redazione delle figure relative ai dati di monitoraggio.

BIBLIOGRAFIA

- ARDILLO F., BAIÒ F., COMI M., CROSTA G.B., FRASSONI A., MANNUCCI G., NICOLOSO A., NOTARPIETRO A., PEZZETTI G., REGUZZONI M., SCARAMELLINI M. (2005). Monitoraggio. Linee guida per il controllo dei fenomeni franosi. A cura di G. Mannucci e A. Notarpietro. Agenzia regionale per la protezione ambientale della Lombardia. Vol. 1, p. 125.
- BENEDETTI G., BERNARDI M., BORGATTI L., CONTINELLI F., GHIROTTI M., GUERRA C., LANDUZZI A., LUCENTE C.C., MARCHI G. (2011). 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
- 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,
- 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.
- LUCENTE C.C. (2014a). Il crollo del versante nord della rupe di San Leo del 27 Febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza. Il Geologo dell'Emilia-Romagna, 52, 6-22.
- LUCENTE C.C. (2014b). Interventi di messa in opera e avvio del monitoraggio di fase 2 nella zona del crollo della Rupe di San Leo. Relazione Tecnica di Progetto esecutivo. Regione Emilia-Romagna, Agenzia per la sicurezza del territorio e la protezione civile.
- SPREAFICO M.C., FRANCONI M., CERVI F., STEAD D., BITELLI G., GHIROTTI M., GIRELLI V.A. LUCENTE C.C., TINI M.A., BORGATTI L. (2015). Back analysis of the 2014 San Leo landslide using combined terrestrial laser scanning 3D distinct element modelling. Rock Mechanics and Rock Engineering.



L'IMPIEGO DEL DRONE NEL MONITORAGGIO DELLA FRANA DI CROLLO DELLA RUPE DI SAN LEO

M. DUBBINI*, C.C. LUCENTE**

* *Ingegnere presso il Dipartimento di Storia Cultura Civiltà DiSCi, sez. Geografia - Università di Bologna*

** *Geologo presso Agenzia regionale per la sicurezza territoriale e la protezione civile - Servizio Area Romagna*

CON IL CONTRIBUTO DEL DOTT. GIACOMO UGUCCIONI,
TECNICO PRESSO SAL ENGINEERING

1. INTRODUZIONE

La realizzazione di prodotti geometrici tridimensionali ad elevata accuratezza e risoluzione risulta essere oggi sempre più importante nello studio dei fenomeni di dissesto idrogeologico sia da un punto di vista geomorfologico che geotecnico-geomeccanico. Quello che sino ad oggi si riteneva prerogativa del laser scanner (aereo e terrestre) per l'acquisizione del dato, in moltissimi contesti viene ad essere integrato e spesso sostituito da tecniche fotogrammetriche. L'integrazione dei classici algoritmi propri della fotogrammetria (Triangolazione Aerea, *bundle adjustment*, equazioni di collinearità, etc.) con gli algoritmi di tipo *Structure from Motion* (SfM) derivanti dalla Computer Vision (CV) consente di ottenere prodotti a nuvola di punti densa di elevatissima qualità e risoluzione con l'automatizzazione quasi completa dei processi. L'utilizzo poi di mezzi a pilotaggio remoto (RPAS, *Remotely Piloted Aircraft Systems*, comunemente noti come droni) equipaggiati con sensori fotografici ad elevata risoluzione, con sensori di posizionamento e sensori di assetto, permette di ottenere in tempi molto brevi e con costi contenuti tutti i dati necessari allo scopo. Attraverso le varie fasi del processamento fotogrammetrico si ottiene come prodotto di base una nuvola di punti densa dalla quale, successivamente alle dovute fasi di pulizia e classificazione, sono ricavati i diversi prodotti per la caratterizzazione geomorfologica di dettaglio. La ripetibilità del dato, necessaria all'inserimento dei rilievi sempre nel medesimo sistema di riferimento senza introdurre trasformazioni tra sistemi, e legata all'elevata accuratezza di determinazione dei *Ground Control Point* (GCP) misurati ed elaborati con tecniche geodetiche per lo più mediante strumentazione GNSS, permette di confrontare dati e modelli successivi nel tempo (Dubbin et al. 2015). La possibilità di avere a bordo dei RPAS sistemi di posizionamento satellitare a doppia frequenza in modo tale da poter definire le coordinate spaziali del centro di presa con accuratezza centimetrica, permette anche di avere ripetibilità del

dato in zone dove diventa difficile, se non impossibile, l'accesso (zone fisicamente inaccessibili e ad elevata pericolosità). L'elevata ripetibilità rende quindi possibile elaborare valutazioni sulla variazione di volumi e forme di superfici. Questa prerogativa consente di applicare la fotogrammetria aerea con drone per il monitoraggio dei fenomeni franosi, a prescindere dalla tipologia (frane da crollo piuttosto che colate o scivolamenti).

In questo contributo vengono illustrati i primi risultati del monitoraggio della frana di San Leo (RN) con tecnica fotogrammetrica aerea attraverso l'impiego del drone. Il monitoraggio è rivolto sia alla parete, fronte del crollo del 2014, che all'accumulo detritico alla base della parete stessa.

Il controllo della parete ha l'obiettivo di valutare eventuali modifiche morfologiche per crolli. È importante tenere conto anche di piccoli crolli che possono essere indizi di detensione lungo fratture che delimitano masse rocciose più grandi e che possono essere quindi il preludio a franamenti importanti. Il monitoraggio fotogrammetrico consente di avere un controllo sulla parete e sul ciglio della parete in maniera diffusa su tutto il fronte d'interesse, integrandosi perfettamente con il sistema di monitoraggio geotecnico installato a San Leo (vedi contributo precedente), il quale pur monitorando molte delle fratture presenti sulla sommità e all'interno dell'ammasso roccioso non arriva a controllare le fratture più esterne, né tantomeno è in grado di controllare i crolli più superficiali in parete.

Il monitoraggio fotogrammetrico tiene sotto controllo, sia pure in forma non continua, anche l'enorme massa detritica che si è accumulata ai piedi del fronte del crollo. Tale coltre detritica attualmente ricopre il contatto tra l'ammasso roccioso e il substrato argilloso sottostante, proteggendo le argilliti dall'erosione e limitando il fenomeno dello scavernamento spinto che risulta essere all'origine dei grandi crolli come quello del 2014 (Figura 1; vedi paragrafo n.2 del contributo precedente; Borgatti et al., 2014; Lucente,

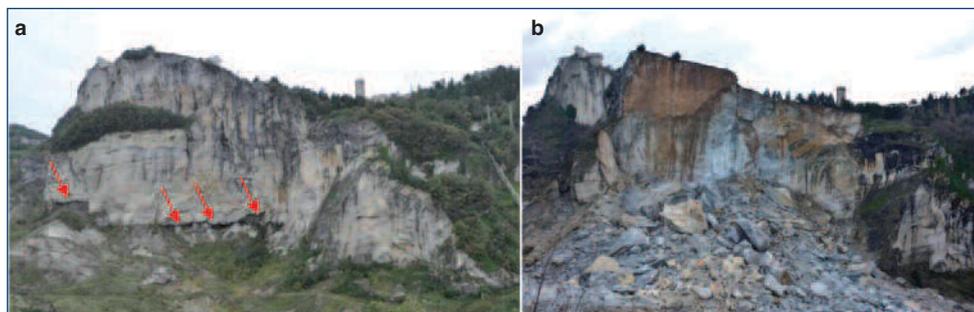


Figura 1. Immagini della parete nord della Rupe di San Leo prima (a) e dopo (b) il crollo del 2014. In a) Le frecce mettono in evidenza la fascia di contatto tra l'ammasso roccioso e le argilliti, caratterizzata da ampie cavità (scavernamenti). In b) si apprezza la spessa coltre detritica che attualmente maschera il contatto.

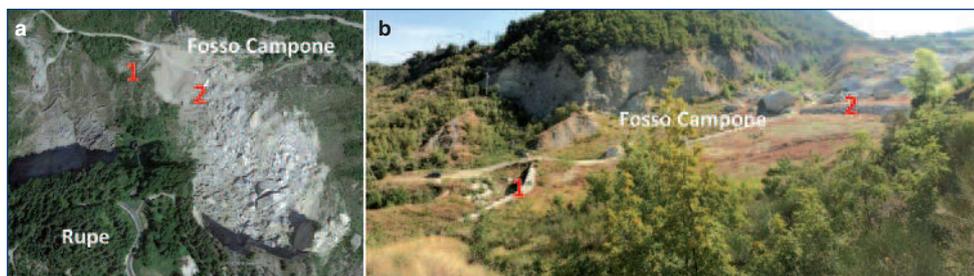


Figura 2. Ubicazione, in foto aerea (a) e in panoramica (b), delle opere strutturali realizzate per il contenimento della coltre detritica nel fosso Campone.

2014). Rimane comunque evidente che l'ammaloramento e il rifluimento delle argille può essere impedito solo attraverso l'allontanamento delle acque in corrispondenza del contatto argille – ammasso roccioso.

L'Agenzia regionale per la sicurezza del territorio e la protezione civile ha già realizzato due opere strutturali per il contenimento della coltre detritica e una prima regimazione delle acque nel fosso Campone con l'obiettivo di mantenere la coltre detritica a ridosso della parete rocciosa. In quest'ottica, il monitoraggio della coltre detritica assume un ruolo importante per la prevenzione del rischio idrogeologico generale della rupe e, contestualmente, permette di valutare l'efficienza delle opere sinora realizzate (Figura 2).

2. IL RILIEVO AEREO FOTOGRAMMETRICO

In questi ultimi anni, la fotogrammetria digitale, terrestre ma soprattutto aerea, ha acquistato un ruolo sempre più importante nell'ambito del controllo e del monitoraggio del territorio. Lo sviluppo di sofisticati algoritmi di tipo SfM (*Structure from Motion*, fondati sul *matching* automatico di caratteristiche comuni individuabili su un numero elevato di fotogrammi consecutivi) che derivano da discipline legate alla *Computer Vision*, integrati ai classici algoritmi propri della fotogrammetria (equazioni di collinearità, triangolazione aerea / *bundle adjustment*), permettono un'elevatissima automatizzazione di gran parte dei processi, utilizzando sistemi di acquisizione (camere fotografiche) di costo relativamente basso. Questo perché tali procedure determinano, anche in modo estremamente accurato, i cosiddetti parametri di calibrazione della camera fotografica quali focale, posizione del punto principale sul sensore e curva di distorsione dell'obiettivo, fondamentali all'interno del processo fotogrammetrico. Tutto ciò fornisce un risultato finale in ter-

mini di modello tridimensionale e ortofoto di precisione con elevatissima definizione e accuratezza (Mancini et al. 2013). Lo sviluppo di queste tecniche, cosiddette *Image-based*, portano alla creazione di nuvole di punti ad altissima definizione e densità la quale dipende dalla risoluzione dell'immagine e, territorialmente, dal GSD (*Ground Sample Distance*) del *pixel*, cioè la dimensione dello stesso *pixel* proiettato sull'oggetto. Il prodotto 3D che si ottiene è appunto una nuvola di punti che rappresenta il DSM (*Digital Surface Model*) della superficie e questo è comunque un limite qualora si sia in presenza, ad esempio, di vegetazione. La vegetazione in genere (sia alta che bassa) crea spesso e volentieri *outlier* in quanto il movimento della stessa dovuto ad esempio al vento provoca un effetto di errore che possiamo assimilare a variazioni di parallasse che si ripercuote maggiormente nella coordinata parallela all'asse di presa, solitamente la Z (quota) del modello nel sistema cartesiano XYZ per acquisizioni aeree. La rimozione degli *outlier* prevede l'applicazione di algoritmi di classificazione che devono essere ben parametrizzati e, sicuramente, anche una fase di indagine visiva e di *editing* manuale.

L'acquisizione delle immagini aeree può avvenire con qualsiasi tipo di mezzo che possa sollevare la camera e farla acquisire nella modalità prescelta e più opportuna. Per poter applicare il processamento fotogrammetrico mediante algoritmi SfM, occorre un'elevata percentuale di sovrapposizione tra fotogrammi in sequenza (almeno 80%) per cui risulta essenziale che l'acquisizione fotogrammetrica avvenga mediante voli con traiettorie predefinite. Nell'area ricoperta dal volo fotogrammetrico devono essere necessariamente posizionati (o individuati) una serie di target ben visibili e misurabili, per definire il sistema di riferimento del modello e aiutare notevolmente il processo di autocalibrazione della camera. Si può fare a meno dei *target*, qualora

si riesca a determinare con estrema accuratezza (nell'ordine centimetrico o sub-centimetrico) la posizione nello spazio, nel sistema di riferimento predefinito, di tutti i centri di presa di acquisizione della fotocamera. Solitamente questo avviene quando a bordo del mezzo che solleva la camera è installato un sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) differenziale a doppia frequenza con sistema di correzione RTK o, meglio ancora, con stazione di riferimento a terra per un post-processing cinematico della traiettoria di volo.

Con l'affidabilità sempre crescente dei mezzi a pilotaggio remoto (RPAS, *Remotely Piloted Aircraft Systems*) sia di tipo multirottore che aereo, vi è la possibilità di acquisire dati aerei con un notevole incremento del rapporto benefici/costi e in piena sicurezza.

3. IL RILIEVO DELLA RUPE DI SAN LEO: METODO E PRODOTTI

3.1. Rilievo 2014

Con il crollo del febbraio 2014, su indicazione della Regione Emilia-Romagna (Agenzia per la sicurezza del territorio e la protezione civile, Servizio Area Romagna), la SAL Engineering (per conto di EN.SER.) ha condotto un primo rilievo aerofotogrammetrico con drone multirottore (Figura 3) dell'intera rupe di San Leo (Figura 4a) ed in particolare dell'area di crollo (spigolo nord-est della rupe, sede del distacco).

Per il rilievo sono stati effettuati circa 30 voli (Figura 4b) con drone multirottore equipaggiato con camera fotografica Canon EOS 600D con ottica calibrata. La camera è con sensore di tipo APS-C a 18 megapixel con pixel avente lato di dimensione pari a 0.0042mm con distanza focale pre-calibrata di 26.82 mm. Questo significa che la risoluzione geometrica del modello tridimensionale che si verrà ad ottenere può essere centimetrica. Le acquisizioni sono state effettuate tutte con asse ottico nadirale. Il tempo complessivo di acquisizione (comprensivo di tutti le fasi di rilievo topografico a terra dei target di riferimento con strumentazione GNSS; Figura 5) è stato di circa 25 ore: la qualità dei prodotti ottenuti conferma la funzionalità della metodologia.

Noti i parametri di calibrazione della camera e rispettate le regole di definizione delle traiettorie di volo assicurando la sovrapposizione fotogrammetrica longitudinale per l'80% e laterale per il 30%, necessaria all'applicazione degli algoritmi delle metodologie *Image-Based*), in fase di pianificazione del rilievo (Figura 4b) è importante poter imporre in modo accurato il GSD (*Ground Sample Distance*, dimensione del pixel riportato al suolo) da cui dipende la risoluzione del modello geometrico tridimensionale che ne deriva. Nel caso in esame, la quota media relativa di volo è stata definita pari a 68 m, per assicurare un GSD medio pari a 0.015m.

Sono stati acquisiti circa 12000 immagini nadirali di cui, dopo accurata selezione, in relazione alla qualità dell'immagine, ne sono state utilizzate circa 8000.

Sono state acquisite anche una serie di immagini (circa 700 immagini) con asse ottico obliquo, quasi ortogonale alla parete di crollo, per poter realizzare un modello tridimensionale a nuvola di punti dettagliato della parete. Per il rilievo del fronte del crollo, il volo è stato effettuato mantenendo una distanza costante dalla parete di circa 30m, eseguendo traiettorie parallele alla parete stessa e acquisendo le immagini con la solita sovrapposizione longitudinale e laterale dei fotogrammi.

Prima dell'avvio della fase di acquisizione dei fotogrammi aerei (e di parete), sono stati posizionati a terra una serie di *target* (Figura 5a). In totale, per 30 voli effettuati, sono stati posizionati circa 180 *target*, misurati con strumentazione GNSS (*Global Navigation Satellite System*) a doppia frequenza. La metodologia utilizzata, per garantire la massima accuratezza possibile e comunque, non superiore a 0.01m-0.02m, è stata quella del rilievo rapido-statico in singola base con *post-processing* dei dati. La stazione di riferimento (*Master*) per il processamento dei dati è stata posizionata su un punto materializzato all'interno della fortezza (Figura 5b). Le coordinate di questo punto sono state precedentemente definite attraverso 48 ore di acquisizione e calcolate in *post-processing* nel sistema di riferimento IGS08 utilizzando 4 stazioni permanenti della rete internazionale EUREF: MSEL (Medicina, BO), IGMI (Firenze), GARI (Porto Garibaldi, FE) e UNPG (Perugia) (Castagnetti et al., 2009). Le coordinate di questo punto vengono prese come riferimento anche per tutti i rilievi successivi che sono stati effettuati e per tutti quelli che verranno in futuro. La scelta è stata fatta per poter avere un riferimento solidale sulla rupe di San Leo e rendere i risultati di tutti i rilievi futuri confrontabili e ripetibili.

Nel *processing* dei dati, i *target* sono utilizzati come vincoli per la fase di determinazione dei parametri di orientamento interno ed esterno delle immagini (Barazzetti et al., 2010) e per la determinazione accurata delle coordinate dei punti che costituiranno il modello (Harwin et al., 2012), oltre che per l'ottenimento di una corretta georeferenziazione complessiva del modello e di tutto ciò che ne deriva. Il metodo utilizzato è quello basato sul *bundle adjustment* (stelle proiettive). Si è dimostrato da tempo, e recentemente pubblicato (Sanz-Ablanedo et al., 2018), che la

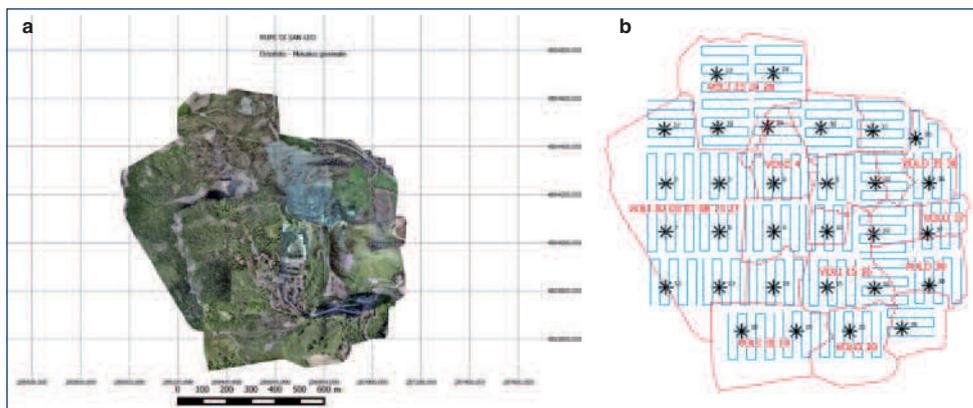


Figura 3.
Drone multirottore ESAPLY 2500 di SAL Engineering (Modena) equipaggiato con camera fotografica Canon EOS 600D.

Figura 4.

a) Ortofoto di precisione derivante dal rilievo fotogrammetrico che mostra l'estensione (circa 110Ha) dell'area di rilievo attorno alla rupe di San Leo (RN).

b) Pianificazione del rilievo fotogrammetrico della Rupe di San Leo (RN) in ambiente GIS per le acquisizioni con camera ad asse ottico nadirale.

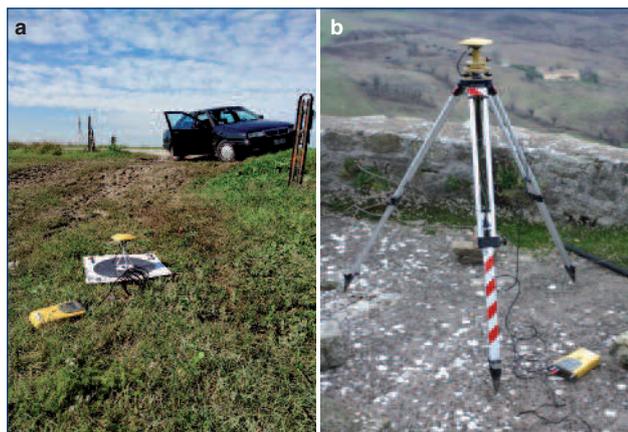


corretta distribuzione dei *target* è fondamentale per l'ottenimento di un risultato molto accurato e completamente coerente da un punto di vista geometrico. I restanti *target* misurati sono stati utilizzati esclusivamente come punti di controllo a garanzia della corretta accuratezza di tutti i prodotti finali realizzati.

I blocchi di fotogrammi acquisiti vengono caricati e processati in *software* di tipo *Image-Based* (nello specifico Photoscan, Agisoft®) con lo scopo della creazione di una nuvola densa di punti (paragonabile a quella derivante da acquisizioni *laser scanner*) e che si configura come il prodotto base da cui ricavare i prodotti tridimensionali e bidimensionali necessari. Come menzionato, questi *software* utilizzano algoritmi di tipo *Structure from Motion* per l'individuazione automatica dei punti omologhi sui fotogrammi quali, di norma, l'algoritmo SIFT (Lowe, 2004) e RANSAC (Fischler and Bolles, 1981). Questi sono integrati con gli algoritmi propri fotogrammetrici basati sulle cosiddette equazioni di collinearità utilizzando la metodologia di *bundle adjustment*/triangolazione aerea attraverso la quale vengono definiti il sistema di riferimento (con i vincoli dati dai *target* misurati) e il modello tridimensionale metrico rigido

Figura 5.

a) Misura *target* fotogrammetrico mediante strumentazione GNSS doppia frequenza Topcon GB500; b) Stazione GNSS di riferimento "MASTER" su punto materializzato su un baluardo della rocca di San Leo (RN).



rosso a nuvola di punti dell'oggetto del rilievo. Dalla nuvola di punti è possibile generare una superficie geometrica tridimensionale, *mesh*, di norma TIN (*Triangulated Irregular Network*), la cui collezione di vertici è definita dagli stessi punti della nuvola densa.

Al termine di tutti i processi di elaborazione sono stati creati i seguenti prodotti:

- DSM (*Digital Surface Model*) di tutta la zona di rilievo a nuvola di punti a risoluzione media di 1pt/8cm. Attraverso algoritmi di classificazione basati su algoritmi che analizzano e utilizzano vincoli di tipo geometrico e radiometrico è stato ricavato il DTM (*Digital Terrain Model*) ricampionato su grigliato regolare (*grid*) con 1pt/40cm (Figura 6a);
- *Mesh* attraverso modello TIN utilizzando sia il DSM che il DTM precedentemente ottenuto (Figura 6b);
- Piano a curve di livello con equidistanza pari a 2m, consona per una rappresentazione in scala nominale pari a 1:2000;
- Ortofoto mosaicata di precisione di tutta l'area oggetto del rilievo, con risoluzione pixel pari a 5cm, utilizzando la *mesh* del DSM come modello per la correzione differenziale (Figura 5a);
- Modello DSM ad alta risoluzione (1pt/2cm) della parete Nord-Est della rupe interessata dal crollo.

Per la validazione dei prodotti è stata eseguita l'analisi dei risultati in corrispondenza dei *target* fotogrammetrici non utilizzati per il processo di elaborazione, in entrambe le nuvole di punti, arrivando a calcolare uno scarto quadratico medio complessivo pari a 0.03 cm. Tale valore risulta essere consona con le analisi di tipo geometrico in relazione all'interpretazione dei fenomeni che ci si appresta a valutare da un punto di vista geotecnico e geomeccanico.

3.2. Rilievo 2016

Nel dicembre del 2016 è stato effettuato un secondo rilievo fotogrammetrico aereo limitato al settore nord della rupe di San Leo comprendendo la parete e il versante argilloso sottostante (Figura 7), per verificare, a distanza di più di due anni dal crollo, eventuali modifiche morfologiche della pa-

rete e movimenti della coltre detritica.

Oltre alle traiettorie con asse ottico nadirale ad una quota di 65-70 metri, sono stati effettuati voli con asse ottico obliquo quasi ortogonale alla parete a distanza costante di circa 30m.

Rispetto al rilievo del 2014, è stato utilizzato lo stesso mezzo a pilotaggio remoto e la stessa camera fotografica con ottica calibrata. La misura dei *target*, posizionati secondo lo schema illustrato in Figura 7, sono stati misurati con la medesima strumentazione GNSS e la stazione *Master* di riferimento è stata posizionata sullo stesso medesimo punto (Figura 5b). Infine, per il processamento delle immagini acquisite, e per l'elaborazione dei dati GNSS, sono state adottate le stesse procedure di calcolo, impiegate nel rilievo del 2014. In questo modo, le nuvole dense (Figura 8) sono risultate perfettamente confrontabili dal punto di vista geometrico.

4. COMPARAZIONE DEI RILIEVI DEL 2014 E DEL 2016

Il primo passo di confronto tra i due rilievi si basa sugli scostamenti dei dati, valutati attraverso 4 sezioni di riferimento. Le due nuvole di punti sono state caricate contempora-

neamente in ambiente *CloudCompare*, software *opensource* sviluppato appositamente per gestire nuvole di punti e fare confronti attraverso diversi tipi di algoritmi, che sono oggetto di continui aggiornamenti e miglioramenti ad opera della comunità scientifica.

La confrontabilità delle nuvole viene garantita, utilizzando la stessa strumentazione per l'acquisizione dei dati e replicando fedelmente le operazioni di acquisizione ed elaborazione dei dati. Ovviamente è indispensabile rimanere all'interno del medesimo sistema di riferimento, avendo cura che l'errore assoluto non sia superiore alla risoluzione del dato acquisito.

Le sezioni indicate in Figura 9, sono state eseguite in ambiente *CloudCompare*. Le sezioni 1-1 e 4-4 sono state realizzate in zone dove non vi sono stati crolli successivi al 2014, mentre le sezioni 2-2 e 3-3 mostrano aree interessate da successivi crolli, sia pure di modesta entità (vedi in seguito). In Figura 10 si apprezza la geometria delle 4 sezioni.

Nel periodo intercorso tra primavera 2014 (primo rilievo) e Dicembre 2016 (ultimo rilievo) la parete non è rimasta immutata ma è stata ancora interessata da distacchi in alcuni punti, soprattutto laddove, a seguito del crollo del 2014, erano rimasti sospesi volumi rocciosi in precarie condizioni di equilibrio.

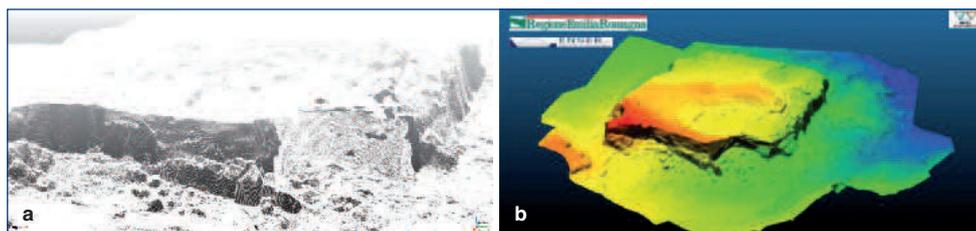


Figura 6.
a) Modello DTM a nuvola di punti del rilievo del 2014 della rupe di San Leo (RN).
b) Modello mesh della rupe di San Leo (RN). La colorazione è proporzionale alla quota assoluta di ciascun elemento.

Figura 7.

a) Il poligono rosso rappresenta l'area del rilievo di dicembre 2016. I due poligoni azzurri sono in corrispondenza del crollo del 2014 della parete Nord-Est e del precedente crollo del 2006 nella parete Nord.
b) Traiettorie reali di volo per le acquisizioni fotogrammetriche aeree con il drone ad asse ottico nadirale. In entrambe le figure i pallini verdi e rossi rappresentano la posizione a terra dei target fotogrammetrici.

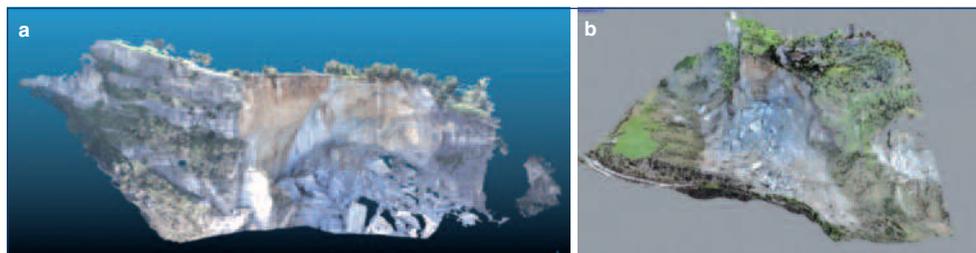
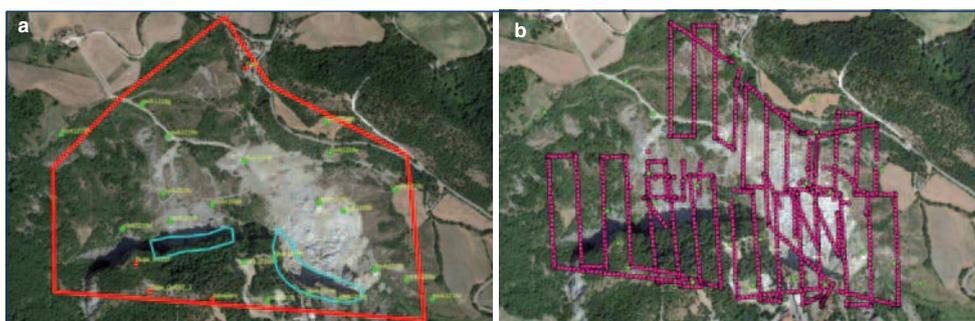


Figura 8.
a) Nuvola di punti densa della parete Nord-Est derivante dal rilievo fotogrammetrico aereo della primavera del 2014.
b) Nuvola di punti densa della parete Nord-Est derivante dal rilievo fotogrammetrico aereo del dicembre 2016.

Figura 9.
Traccia delle sezioni indicate sull'ortofoto mosaicata del rilievo di dicembre 2016.



5. MONITORAGGIO DELLA PARETE

Partendo dal confronto di sezioni (Figura 10) e fotografie (Figura 11), è stato possibile verificare che sono avvenuti dei crolli; inoltre, l'analisi comparata delle due nuvole di punti ad alta risoluzione, ha consentito di confermare tali informazioni fornendo ulteriori dettagli.

Attraverso l'utilizzo del software *CloudCompare*, è stata effettuata l'analisi quantitativa delle differenze volumetriche intercorse tra il primo rilievo (primavera 2014) e il secondo rilievo fotogrammetrico (dicembre 2016). La prima fase è stata quella di determinare le zone in cui si è manifestata una variazione di volume significativa sia negativa (crolli) che positiva (accumuli). A tale scopo, è stato utilizzato

Figura 10.
Sezioni dei modelli a nuvole di punti: in blu il modello riferito al rilievo del marzo 2014, in rosso il modello riferito al rilievo del dicembre 2016. a) sez. 1-1, b) sez. 4-4, c) sez. 2-2, d) sez. 3-3.

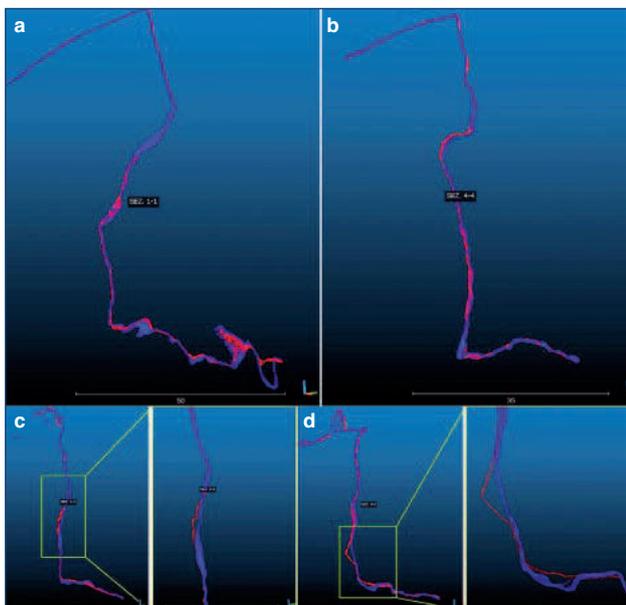
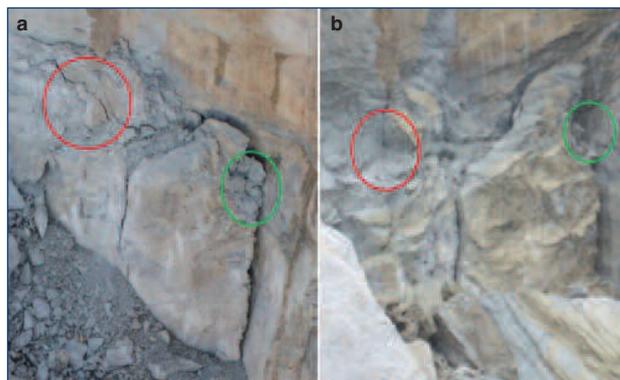


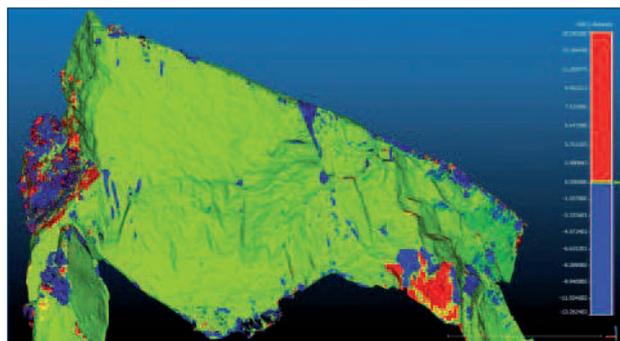
Figura 11.
Esempio di crollo: a) immagine acquisita nella primavera del 2014; b) immagine acquisita a dicembre 2016. I cerchi con lo stesso colore identificano la medesima zona ad una distanza temporale di circa 32 mesi.



l'algoritmo M3C2 (James et al, 2017) implementato in *CloudCompare*. Questo algoritmo consente di eseguire il calcolo delle variazioni tra nuvole utilizzando i valori di precisione della misurazione memorizzati nei campi scalari delle nuvole di punti. Viene quindi determinata la distanza tra le due nuvole di punti utilizzando come direzione di misura quella determinata dalle normali calcolate nella nuvola di riferimento; nel caso specifico è stata utilizzata quella derivante dal rilievo del 2014 (Figura 12).

Successivamente alla determinazione delle aree di variazione, sono state individuate le zone in cui la variazione di volume risulta essere significativa e comunque superiore alla soglia di 1.5 metri cubi. Il calcolo è stato eseguito attraverso la differenza dei volumi definiti tra la nuvola di punti del 2014 e quella del 2016, calcolati riferendosi allo stesso piano, di volta in volta definito in modo tale da essere il più possibile ortogonale alla media delle direzioni normali precedentemente calcolate. Nella Figura 13, vengono evidenziati e numerati i volumi di crollo che superano il limite di soglia significativo e la successiva Tabella 1 mostra i valori di tali volumi.

Figura 12.
Determinazione delle distanze positive (rosse) e negative (blu) mediante l'applicazione dell'algoritmo M3C2. Le zone mappate in rosso evidenziano accumuli o spostamento di ammassi rocciosi, le zone mappate in blu evidenziano crolli.



Il volume identificato con Vol.6 (Figura 13 e Tabella 1) risulta essere quello di entità maggiore, circa 200m³ di roccia crollata e corrisponde ad un diedro di roccia facente parte di un ammasso particolarmente fratturato, distaccato e crollato nella prima metà del 2015, posizionato in sommità del coronamento della parete crollata e in prossimità di una civile abitazione già evacuata nel 2014. L'evento ha rivelato un piano inclinato di circa 45-60° lungo il quale si è sviluppato il movimento (scivolamento) ed è avvenuto in seguito ad un periodo di abbondanti piogge in appennino romagnolo (tra Ottobre e Novembre 2014 +40% di pioggia accumulata nella stazione meteorologica di Rimini rispetto alla media). I volumi Vol.1 e Vol.4 rispettivamente di circa 80m³ e 40m³ corrispondono ai crolli illustrati in Figura 11. Un ulteriore fenomeno facilmente individuabile successivamente all'applicazione dell'algoritmo M3C2 risulta essere quello dell'individuazione di zone in cui la differenza tra la nuvola dei punti relativa all'anno 2016 e all'anno 2014 risulta essere positiva, come mostra la figura 14. Questo fenomeno risulta essere in parte dovuto ad accumulo

Figura 13.
Individuazione e numerazione delle zone in cui è stato determinato il volume di crollo.

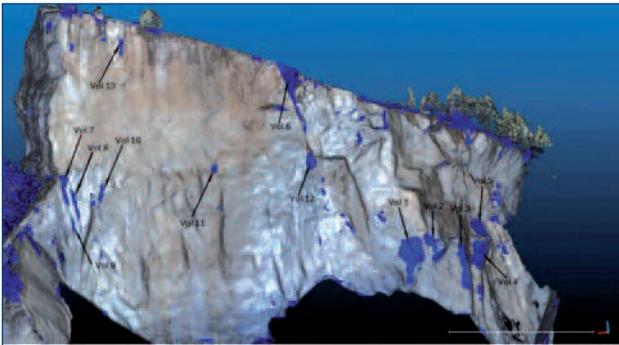


TABELLA 1.
Quantificazione dei volumi di crollo.

ID	VOLUME M ³
Vol.1	79.2
Vol.2	23.9
Vol.3	23.8
Vol.4	43.9
VOL.5	43.5
VOL.6	209.6
VOL.7	10.7
VOL.8	5.1
VOL.9	1.8
VOL.10	3.4
VOL.11	2.1
VOL.12	7.9
VOL.13	2.6

di detriti provenienti da piccoli crolli arrestati da sporgenze o accumulati all'interno di fratture già presenti nell'ammasso roccioso. Ancora più rilevante è che, in alcuni casi, le "forme positive" possono essere legate anche ad uno spostamento di parte dell'ammasso roccioso. Queste evidenze ben quantificabili potrebbero indicare zone di crolli futuri (potenziali).

6. MONITORAGGIO DELLA COLTRE DETRITICA

La verifica della massa detritica accumulata ai piedi della parete si è basata principalmente sul confronto tra le ortofoto 2014 e 2016, in quanto, rispetto ai modelli tridimensionali, grazie alla loro elevata risoluzione, (GSD pari a 2-5cm) mettono in risalto un numero maggiore di particolari che risultano meno definiti nei DSM.

Dal confronto delle ortofoto sono emerse diverse variazioni significative, a cominciare dalla fascia più prossimale del detrito a contatto con la base della parete. Qui si sono osservati dei piccoli accumuli a seguito dei crolli individuati nel corso delle verifiche fatte in parete. Altra significativa variazione si è avuta ai piedi della frana a causa dei lavori per la realizzazione di una briglia di contenimento per la mitigazione del rischio ad opera della Agenzia regionale per la sicurezza del territorio e la protezione civile. Infatti, durante i suddetti lavori, una buona parte dei massi è stata asportata e/o movimentata. Ai bordi della superficie franata la vegetazione ha riconquistato spazio così come in altri punti localizzati, sparsi all'interno della zona occupata dal detrito: la comparsa di zone più scure tra i massi nel dato del 2016 rivela la formazione di vegetazione. Per la presenza di preesistenti fratture alcuni enormi massi si sono disintegrati in blocchi minori non reggendo più alla tensione a cui erano sottoposti.

Il monitoraggio della massa accumulata alla base della rupe è fondamentale soprattutto in relazione alla potenziale riattivazione di frane per scivolamento e/o colamento delle argille sottostanti che trascinerrebbero a valle, ovviamente,

Figura 14.
Quantificazione delle distanze di scostamento positivo tra la nuvola di punti determinata nel dicembre del 2016 e la nuvola di punti determinata nella primavera del 2014.

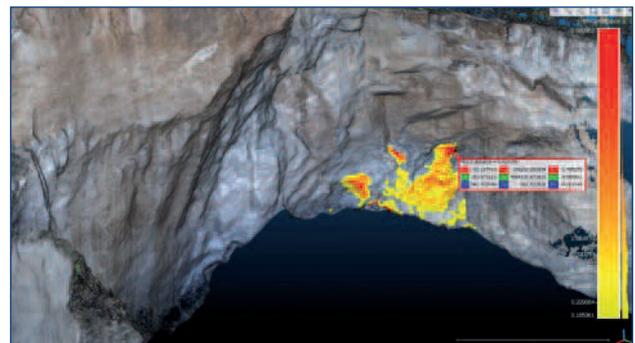
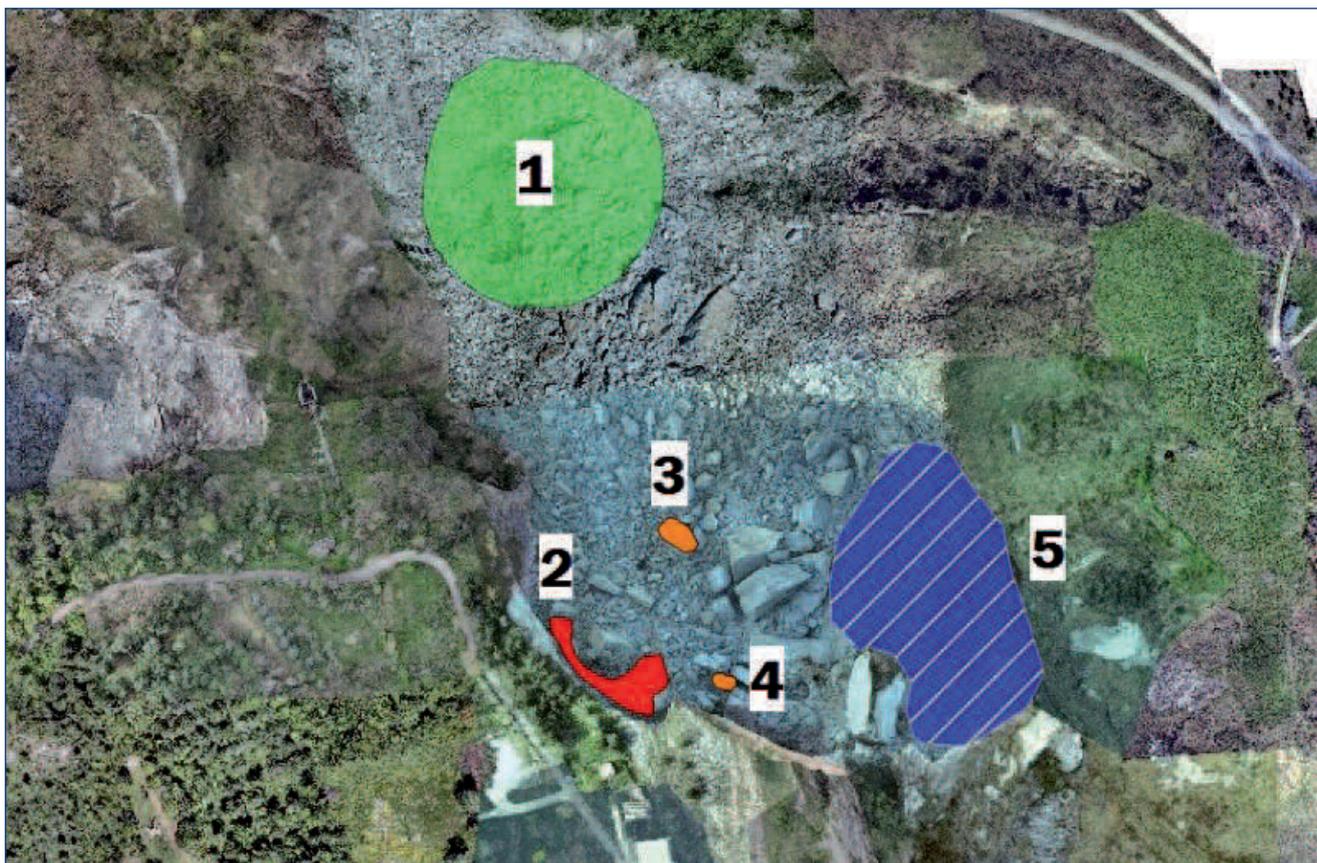
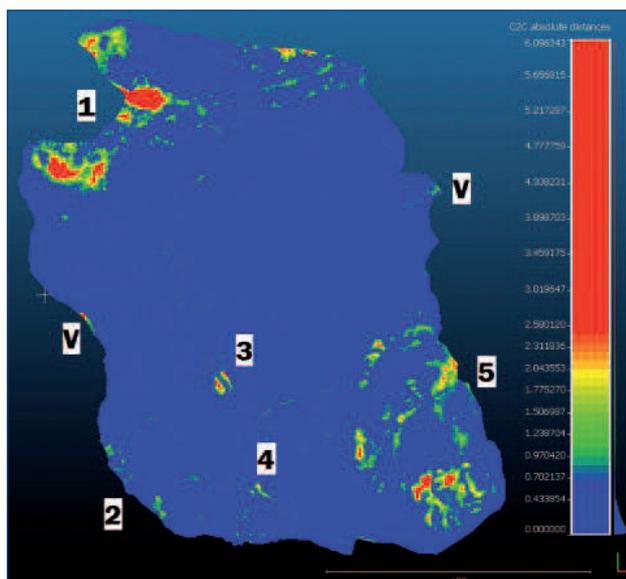


Figura 15.

Le diverse zone della colata detritica interessate da movimenti riportate sull'ortofoto 2014. 1: materiale rimosso a seguito dei lavori per la realizzazione della briglia. 2: area di accumulo detriti provenienti dai crolli segnalati precedentemente. 3 e 4: massi di grandi dimensioni spaccati in due. 5: grande area sul fianco destro interessata da scivolamento.

**Figura 16.**

Rappresentazione grafica della variazione delle distanze assolute valutate dal confronto delle nuvole di punti 2014 e 2016. I numeri indicano zone particolari dove si manifestano dislocazioni: 1) zona dei lavori realizzazione briglia di contenimento; 2) parte del materiale crollato dalla parete tra il 2014 e 2016; 3) e 4) grandi blocchi spaccati; 5) zona di scivolamento.



anche la copertura detritica. Attualmente, la massa detritica protegge dall'erosione spinta le argilliti al contatto con l'ammasso roccioso, alla base della parete di crollo. La mobilitazione del detrito nel lungo termine lascerebbe spazio alla riattivazione della sottoescavazione e scalzamento al piede della rupe, fenomeno predisponente a possibili futuri crolli alla stregua di quanto è avvenuto nelle grandi frane del 2014 e del 2006 (Borgatti et al., 2014).

Se nella parte più consistente e centrale della frana non sono stati riscontrati movimenti, la stessa cosa non si può dire per il fianco destro (rispetto al senso di movimento). Qui, infatti, una porzione della coltre detritica poco meno estesa di un ettaro (8500 m²) è stata interessata da episodi di scivolamento. La Figura 15 vuole riassumere quanto riportato sopra.

È stata effettuata un'analisi di variazione delle distanze assolute (Figura 16) attraverso la comparazione delle nuvole di punti appartenenti al modello DSM relative al rilievo della primavera del 2014 e di dicembre 2016. L'analisi ha evidenziato in modo chiaro le zone dell'area di accumulo in cui nell'arco di 32 mesi circa sono avvenute delle variazioni. Sono state considerate significative le variazioni superiori ai 45 cm e relative ai blocchi medio-grandi che compongono l'accumulo di

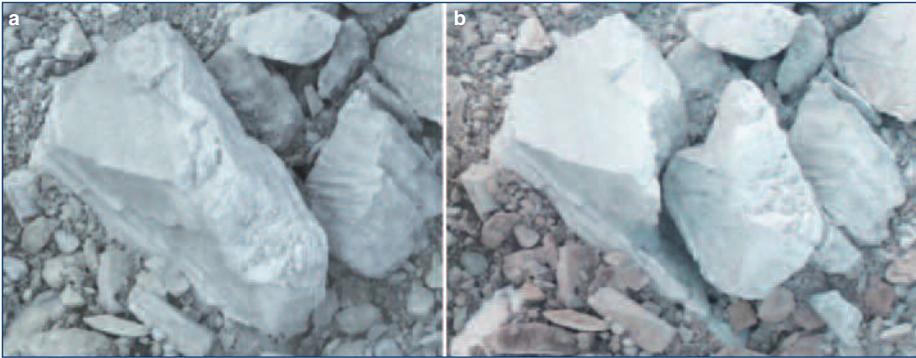


Figura 17.
a) Blocco 3 dopo il crollo del 2014;
b) Blocco 3 nel dicembre del 2016.

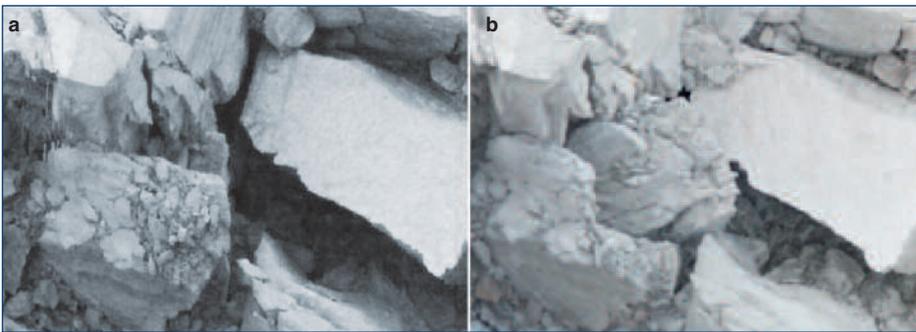


Figura 18.
a) Blocco 4 dopo il crollo del 2014;
b) Blocco 4 nel dicembre del 2016.

Figura 19.

a) Dislocazione valutata su blocchi medi-grandi rappresentata sull'ortofoto mosaicata della primavera del 2014. In colore rosa lo scontorno dei blocchi nella posizione del 2014 e in azzurro lo scontorno degli stessi blocchi in posizione 2016. La dislocazione è valutata in corrispondenza dei centroidi dei blocchi e rappresentata con vettori, in corrispondenza dei quali è riportato il valore dello spostamento. b) Soli vettori spostamento. L'aumento di intensità del colore è in funzione del valore di dislocazione.



crollo, vale a dire di dimensioni medie lineari superiori ai 1.5 m. Nella Figura 16 sono identificate e descritte le diverse zone in cui sono state individuate dislocazioni. Dalla misura della superficie superiore, è possibile arrivare a una stima dei volumi dei due grossi blocchi che si sono spezzati successivamente al crollo tra il febbraio del 2014 e dicembre 2016. Il blocco 3 risulta essere di volume pari

a circa 2000 m³ (Figura 17), il blocco 4 pari a circa 600-800 m³ (Figura 18). In entrambi i casi la parte spezzata ammonta circa ad un terzo del blocco e ha provocato leggeri spostamenti anche sulle rocce adiacenti.

Un primo dato interessante è la superficie ricoperta nel 2014 dalle rocce crollate in seguito al distacco: 68.000 m², ovvero 6,8 ettari. La somma delle aree che hanno riscontrato

movimenti significativi non supera i 2,5 ettari; più della metà ha avuto modifiche riconducibili ad attività antropiche. Questo significa che le modifiche dettate da processi naturali hanno interessato circa il 15% del detrito di frana in oltre due anni e mezzo.

Nella Figura 19 sono rappresentati i vettori spostamento relativi alla dislocazione dei blocchi di dimensione significativa che sono presenti all'interno della zona 5) individuata in Figura 16 dopo l'analisi della variazione delle distanze dal confronto dei modelli tridimensionali. I vettori sono applicati ai centroidi dei poligoni di perimetro dei blocchi, valutati dal confronto delle due ortofoto mosaicate rispettivamente dell'anno 2014 e dell'anno 2016.

7. CONCLUSIONI

L'identificazione dei cambiamenti avvenuti a distanza di 32 mesi sia sulla parete di crollo sia sul corpo detritico alla base della parete ha verificato e validato l'efficacia dell'utilizzo di tecniche fotogrammetriche con acquisizione dei dati da mezzo a pilotaggio remoto (drone) per il controllo e il monitoraggio dei fenomeni franosi.

La versatilità del drone unita alla sofisticata strumentazione (sensori e fotocamera) per l'acquisizione fotogrammetrica hanno consentito di rilevare con estremo dettaglio e in breve tempo l'ampia zona del dissesto che ha interessato la Rupe di San Leo, e questo senza alcuna esposizione al pericolo da parte degli operatori, raggiungendo punti di osservazione non affrontabili con altri sistemi di indagine. Attraverso l'acquisizione di quasi 4000 immagini complessive (specifiche di parete e nadirali a ridosso della parete) tra la primavera del 2014 e dicembre del 2016, sono stati ottenuti i modelli tridimensionali della superficie ad alta risoluzione sia della parete di crollo che dell'accumulo dei detriti alla base della parete. Dai modelli tridimensionali sono state ottenute anche le ortofoto mosaicate nadirali di precisione.

L'analisi dei dati acquisiti per confronto tra i due rilievi ha evidenziato le seguenti variazioni.

La parete nord-orientale della rupe, nel periodo da Aprile 2014 a Dicembre 2016, ha subito diversi crolli: ne sono stati individuati tredici. Questi episodi hanno coinvolto in particolar modo il materiale roccioso superficiale (volumi di roccia caduta tra 2m^3 e 10m^3) o blocchi di dimensioni più importanti (25m^3 ÷ 200m^3) caratterizzati da fratturazioni e condizioni di equilibrio precario sin dal giorno del crollo del 2014. Sono state individuate zone in parete interessate da variazione positiva di materiale tra il 2014 e il 2016 dovuto a piccoli accumuli di materiale all'interno di fratture preesistenti o per possibili spostamenti verso l'esterno di porzioni di parete che possono essere indice di fenomeni di de-tensionamento lungo fratture più o meno superficiali.

L'accumulo di detriti ai piedi della parete, occupante un'area di circa 7 ettari, è stato, a sua volta, interessata da modifiche morfologiche per riattivazione parziale di alcune sue porzioni. I movimenti più interessanti riguardanti la massa detritica sono da imputare alla relazione tra il detrito stesso e le sottostanti argilliti plastiche. In un'area di quasi un ettaro sul fianco orientale del corpo detritico sono stati registrati significativi movimenti di oltre 5 metri: gli spostamenti minimo e massimo ricavati sono stati rispettivamente di 0.18 metri e 21,32 metri, tra la primavera del 2014 e il dicembre del 2016. Alcuni dei grandi massi che caratterizzano il detrito si sono spezzati lungo fratture preesistenti. Le modifiche morfologiche individuate nella parte terminale del detrito (unghia dell'accumulo) sono dovute ad asportazione del materiale a seguito dei lavori di costruzione di una briglia di contenimento. I primi risultati ottenuti, a fronte dei due rilievi eseguiti, sono risultati più che soddisfacenti al punto da ritenere di proseguire l'attività di monitoraggio della parete rocciosa e dell'accumulo detritico con la tecnica della fotogrammetria che si integra perfettamente con le altre forme di monitoraggio adottate a San Leo per la prevenzione e la mitigazione del rischio idrogeologico.

BIBLIOGRAFIA

- CASTAGNETTI C., CASULA G., DUBBINI M., CAPRA A. (2009) "Adjustment and transformation strategies of ItalPoSPermanent GNSS Network", *Annals of Geophysics* vol. 52, n. 2.
- BARAZZETTI, L.; REMONDINO, F.; SCAIONI, M.; BRUMANA, R. (2010). Fully Automatic UAV Image-Based
- Sensor Orientation. In *Proceedings of the 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I*, Calgary, AB, Canada, 15–18 June 2010.
- 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*,
- DUBBINI M., BENEDETTI G., LUCENTE C.C. (2015). 3D geometrical description of landslides using photogrammetric data acquired by Remotely Piloted Aerial System. *EGU General Assembly Conference Abstracts* 17.
- M. A. FISCHLER AND R. C. BOLLES (1981). Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24:381-395.
- HARWIN, S.; LUCIEER, A. (2012). Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sens.*, 4.
- JAMES, M. R., ROBSON, S., AND SMITH, M. W. (2017). 3 D uncertainty based topographic change detection with structure from motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surf. Process. Landforms*, 42: 1769–1788. doi: 10.1002/esp.4125.
- LOWE D.G. (2004). Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 60, 2, pp. 91-110
- LUCENTE C.C. (2014). Il crollo del versante nord della rupe di San Leo del 27 Febbraio 2014: studio e monitoraggio a un anno di distanza. *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 52, 6-22.
- MANCINI F., DUBBINI M., GATTELLI M., STECCHI F., FABBRI S., GABBIANELLI G., (2013). "Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for high resolution reconstruction of topography: the Structure from Motion approach an coastal environments". *REMOTE SENSING*, vol. 5, p. 6880-6898, ISSN: 2072-4292, doi: 10.3390/rs5126880
- SANZ-ABLONADO, E.; CHANDLER, J.H.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.R.; ORDÓÑEZ, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. *Remote Sens.* 2018, 10, 1606.
- CLOUDCOMPARE (VERSION 2.9) [GPL SOFTWARE]. (2018). RETRIEVED FROM [HTTP://WWW.CLOUDCOMPARE.ORG/](http://www.cloudcompare.org/)

X-PAD

ULTIMATE



X-PAD Ultimate

Tutto in un unico software

X-PAD Ultimate è un software modulare, facile da usare per lavori topografici e del cantiere, come rilievi, tracciamenti, catasto, controlli BIM, strade, mappe, batimetria e GIS.

Il software è disponibile sulla piattaforma Android e porta le migliori tecnologie direttamente in campo nella tua mano: una completa visualizzazione 3D ed un sistema CAD per visualizzare e modificare i disegni,

integrazione dei tuoi dati con tutte le tipologie di mappe, supporti per la realtà aumentata e molto altro. XPad Ultimate ti assicura la produttività e ti permette di avere una perfetta integrazione con tutti gli strumenti.

Disponibile in due versioni, una dedicata a chi lavora nel campo della topografia ed una dedicata alle imprese di costruzioni, offrendo ad entrambi delle caratteristiche dedicate.



geomax-positioning.it

©2018 Hexagon AB and/or its subsidiaries and affiliates. All rights reserved.



IL TUO BUSINESS NON CONOSCE CONFINI.



JEEP® COMPASS. BORN TO BE WILD.

Gamma Compass: Consumo di carburante ciclo misto (l/100 km): 6.9 - 4.4; emissioni CO₂ (g/km): 160 - 117 con valori omologati determinati in base al ciclo NEDC di cui al Regolamento (UE) 692/2008. I valori sono indicati a fini comparativi e potrebbero non riflettere i valori effettivi.

Jeep® è un marchio registrato di FCA US LLC.

Jeep[®]
THERE'S ONLY ONE